



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011146035/28, 11.11.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.11.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.11.2011

(45) Опубликовано: 27.03.2013 Бюл. № 9

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **O.V.Kibis, G.Ya и др. Matter Coupling to Strong Electromagnetic Fields in Two-Level Quantum Systems with Broken Inversion Symmetry, Phys. Rev. Lett., v.102, №2, 2009. EP 1504504 B1, 12.07.2006. EP 1804350 A1, 04.07.2007. US 7569847 B2, 04.08.2009. RU 2169413 C2, 20.06.2001.**

Адрес для переписки:

Документ находится в Патентном отделе

ОКБ АСТРОН140081, Московская область, г.Лыткарино,
ул.Парковая, д.1

RU 2 4 7 8 2 4 3 C 1

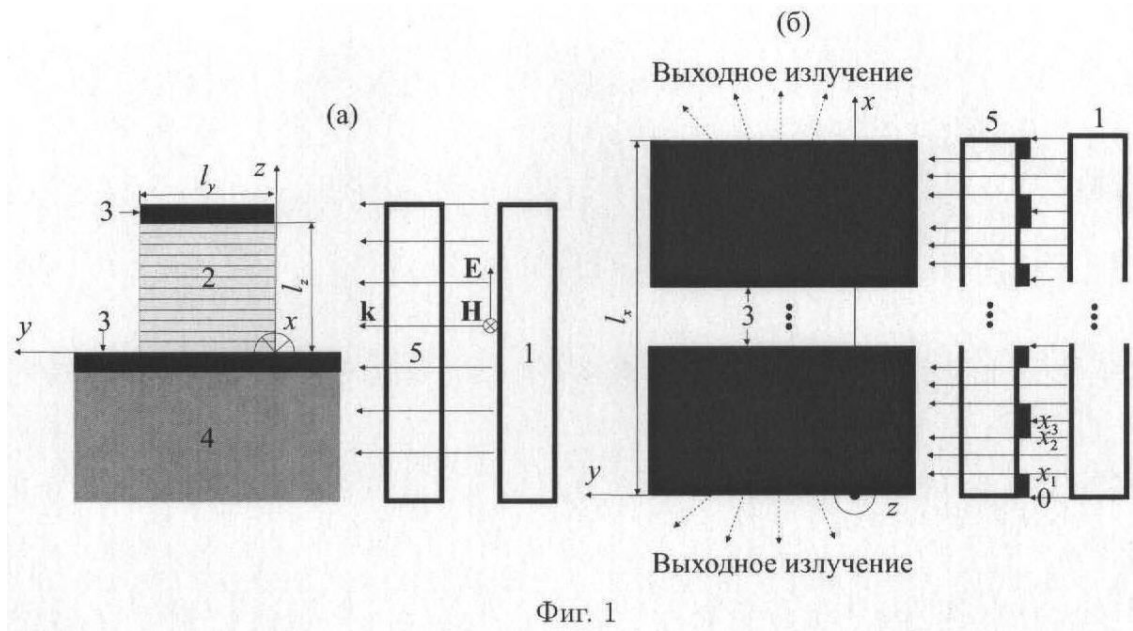
RU 2 4 7 8 2 4 3 C 1

(54) ЧАСТОТНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ИСТОЧНИК КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДАЛЬНЕГО ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

(57) Реферат:

Изобретение относится к генераторам квантового излучения. Частотно-перестраиваемый источник когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения выполнен на основе полупроводниковой наногетероструктуры и возбуждается импульсами среднего инфракрасного диапазона. Между источником возбуждающих импульсов и

полупроводниковой наногетероструктурой расположен фильтр в виде пластинки, с периодически чередующимися прозрачными и непрозрачными полосками для достижения пространственной периодичности поляризации, возбуждаемой в активной области полупроводниковой наногетероструктуры. Технический результат заключается в увеличении мощности излучения. 3 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01S 5/34 (2006.01)
B82B 1/00 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2011146035/28, 11.11.2011**

(24) Effective date for property rights:
11.11.2011

Priority:

(22) Date of filing: **11.11.2011**

(45) Date of publication: **27.03.2013 Bull. 9**

Mail address:

Документ находится в Патентном отделе
ОКБ АСТРОН
140081, Московская область, г.Лыткарино,
ул.Парковая, д.1

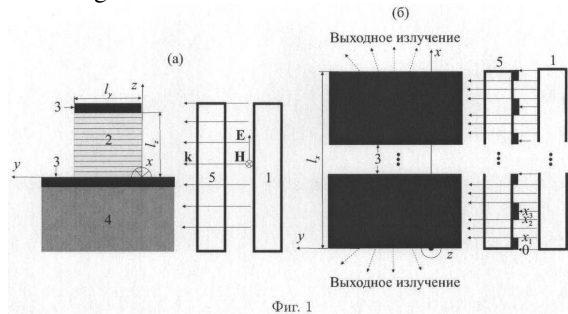
(54) **FREQUENCY-TUNED FAR-INFRARED AND TERAHERTZ COHERENT SOURCE ON SEMICONDUCTOR NANOHEROSTRUCTURE**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: frequency-tuned terahertz and far-infrared coherent source is based on a semiconductor nanoheterostructure and is excited by middle infrared band pulses. Between the source of exciting pulses and the semiconductor nanoheterostructure there is a filter in form of a plate with periodically alternating transparent and opaque strips to achieve spatial periodicity of polarisation, which is excited in the active region of the semiconductor nanoheterostructure.

EFFECT: high radiation power.
3 dwg



Фиг. 1

RU 2 478 243 C1

RU 2 478 243 C1

Изобретение относится к технике генераторов когерентного электромагнитного излучения терагерцового и дальнего инфракрасного диапазона, основанных на внутризонных переходах электронов между уровнями размерного квантования в полупроводниковых наногетероструктурах, возбуждаемых внешним когерентным электромагнитным полем. Изобретение может быть использовано для создания частотно-перестраиваемых и способных работать в непрерывном режиме генераторов излучения данной области частот, которые могут найти применение в медицине, в телекоммуникационных технологиях, в неразрушающей диагностике различных материалов и природных сред (например атмосферы), молекулярной спектроскопии, системах безопасности и др.

Изобретение направлено на разработку мощного и легко перестраиваемого в широком диапазоне частот источника когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения, способного работать в непрерывном режиме. Такое устройство до сих пор не создано, хотя оно и является весьма востребованным как для фундаментальных исследований в областях биологии, молекулярной динамики, физики полупроводников и сверхпроводников, так и для практических приложений в сфере диагностики и лечения различных заболеваний, технологий связи, мониторинга окружающей среды, системах контроля качества продукции и противодействия терроризму и пр.

Одно из направлений работ по созданию источника терагерцового и дальнего инфракрасного излучения заключается в попытках увеличения выходной частоты традиционных генераторов сверхвысоких частот или снижения выходной частоты обычных полупроводниковых диодных лазеров. Однако первый из этих путей связан как с принципиальными, так и техническими трудностями. Так, частота выходного излучения таких приборов вакуумной электроники, как лампы обратной волны, не превышает величины порядка 1,4 ТГц вследствие инерционности электронных процессов, а рабочие частоты гиротронов, как правило, ограничены значениями порядка 1,5 ТГц и достигаются лишь в пульсирующем режиме с малой частотой повторения импульсов: один импульс с длительностью порядка 50 мкс за минуту (В.Л.Братман, А.Г.Литвак, Е.В.Суворов. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения, Успехи физических наук, т.181, №8, 2010, с.867; M.Yu.Glyavin, A.G.Luchinin and G.Yu.Golubiatnikov, Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field, Phys. Rev. Lett., v.100, №1, 2008, 015101). Лазеры на свободных электронах хотя и перекрывают весь терагерцовый и инфракрасный диапазон и обеспечивают достаточно высокую выходную мощность, но являются громоздкими и дорогими установками, способными работать лишь в лабораторных условиях и потому фактически недоступными для использования в практических целях (Т.Маршалл. Лазеры на свободных электронах, пер. с англ., - М., 1987). Выходная частота приборов сверхвысоких частот, основанных на развитии различных электрических неустойчивостей в полупроводниках, также ограничена инерционностью используемых в них процессов и не превышает величины порядка сотни ГГц (диоды Ганна: М.Е.Левинштейн, Ю.К.Пожела, М.С.Шур, Эффект Гана, - М., 1975) или, в лучшем случае, нескольких сотен ГГц (лавинно-пролетные диоды: С.Зи, Физика полупроводниковых приборов, пер. с англ., кн.2, - М., 1984).

С другой стороны, снижение выходной частоты традиционных полупроводниковых диодных лазеров не позволило продвинуться в терагерцовую и дальнюю инфракрасную область и оказалось ограничено величинами, лежащими в среднем инфракрасном диапазоне. Для более низких частот в этих устройствах быстро

увеличивается вероятность ожерекомбинации электронов и дырок и создание достаточно большой инверсии населенностей на лазерном переходе становится невозможным (П.Г.Елисеев. Введение в физику инжекционных лазеров. - М., 1983).

5 Известно устройство, позволяющее частично решить задачу создания источника когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения - так называемый
 терагерцовый квантовый каскадный лазер (R.Kohler, A.Tredicucci, F.Beltram, H.E.Beere, E.H.Linfield, A.G.Davies, D.A.Ritchie, R.C.Iotti and F.Rossi, Terahertz semiconductor-heterostructure laser, Nature, v.417, 2002, pp.156-159, патент US №7548566, МПК⁸ H01S
 10 3/30, опубл. 2009 г.). Основным его компонентом является определенным образом п-допированная сложная сверхрешетка (обычно выполненная на основе AlGaAs гетеросистемы), каждый период которой состоит из последовательности квантовых ям и разделяющих их барьеров различного химического состава и толщины. В результате
 15 подбора параметров такой структуры и наложения на нее внешнего постоянного электрического поля определенной величины удается добиться инверсии населенностей между возникающими в ее зоне проводимости подзонами размерного квантования, характеризующимися частотой перехода, лежащей в терагерцовом или дальнем инфракрасном диапазоне. При этом опустошение нижней лазерной подзоны
 20 осуществляется различными способами, например за счет быстрого туннелирования находящихся в ней электронов в подзону в соседней квантовой яме и их дальнейшего быстрого перехода в нижележащую подзону вследствие резонансного излучения продольного оптического фонона.

25 Недостатком данного устройства является тот факт, что в конкретной его реализации выходная частота является заданной величиной и для ее сколько-нибудь значительного изменения необходимо менять параметры сверхрешетки, образующей его активную область, т.е. выращивать новую гетероструктуру. Кроме того, генерируемое в таком устройстве терагерцовое и дальнейшее инфракрасное излучение
 30 испытывает сильное поглощение на электронах, населяющих мини-зоны, которые формируются в нем для обеспечения протекания электрического тока в поперечном к плоскости роста свехрешетки направлении. Следует также отметить, что в терагерцовом квантовом каскадном лазере не удается создать большую инверсию населенностей между близкими по энергии подзонами размерного квантования,
 35 образующими рабочий переход с частотой, соответствующей терагерцовому или дальнему инфракрасному диапазону. Два последних факта обуславливают малую выходную мощность (и низкий КПД) такого устройства, которая в импульсном режиме не превышает 200-300 мВт в пике, а в непрерывном - 130 мВт (B.S.Williams, Terahertz quantum-cascade lasers, Nature Photonics, v.1, 2007, pp.517-525).

40 Известно также другое устройство, позволяющее частично решить задачу создания источника когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения квантовый каскадный лазер среднего инфракрасного диапазона, генерирующий
 одновременно электромагнитные поля на двух близких частотах ω_1 и ω_2 . В результате их смешения в активной области такого лазера за счет присутствия в ее
 45 диэлектрической проницаемости квадратичного нелинейного слагаемого, обусловленного переходами между подзонами размерного квантования в образующих ее квантовых ямах и имеющего резонансный характер, происходит генерация излучения на разностной частоте $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$, которая лежит в терагерцовом
 50 или дальнем инфракрасном диапазоне (M.A.Belkin, F.Capasso, A.Belyanin, D.L.Sivco, A.Y.Cho, D.C.Oakley, C.J.Vineis and G.W.Turner. Terahertz quantum-cascade-laser source based on intracavity difference-frequency generation, Nature Photonics, v.1, 2007, pp.288-292).

патент US №7974325, МПК⁸ H01S 5/00 (20060101), опубл. 2011 г.). В конкретной реализации устройство было изготовлено на основе InGaAs/AlInAs гетероструктуры, выращенной с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии и согласованной по постоянной решетки с подложкой InP. В качестве верхнего обкладочного слоя волновода был использован слой InP с толщиной 10 мкм, выращенный с помощью металоорганического химического осаждения.

Недостатком этого устройства является то, что хотя резонансная квадратичная нелинейность диэлектрической проницаемости в активной области квантового каскадного лазера и значительно превышает аналогичную нерезонансную величину в обычных нелинейных кристаллах (например GaAs, LiNbO₃), обычно используемых для генерации разностной частоты, она остается достаточно малой. В результате выходная мощность такого устройства также оказывается довольно низкой и составляет в пике (в импульсном режиме с длительностями импульсов 60 нс и частотой их повторения 250 кГц) 7 мкВт при 80 К, снижаясь до 300 нВт при комнатной температуре. Другим недостатком данного устройства является то, что, хотя его выходная частота ω_3 и может сдвигаться с помощью изменения ω_1 и ω_2 путем вариации параметров активной области, в уже готовом образце перестройка ω_1 и ω_2 , а следовательно, и ω_3 , возможна (например за счет изменения температуры структуры) лишь в интервалах, ширины которых много меньше их центральных частот.

В качестве прототипа выбрано устройство, работающее по тому же принципу, что и заявляемое устройство (O.V.Kibis, G.Ya.Slepyan, S.A.Maksimenko and A.Hoffmann, Matter Coupling to Strong Electromagnetic Fields in Two-Level Quantum Systems with Broken Inversion Symmetry, Phys. Rev. Lett., v.102, №2, 2009, 023601). Оно основано на использовании несимметричной квантовой системы, квантовые состояния которой обладают ненулевыми и различными для разных состояний средними дипольными моментами. При помещении такой системы в достаточное сильное внешнее электрическое поле резонансное с переходом между какими-либо ее двумя состояниями, на этом переходе наблюдаются осцилляции Раби (или, что то же, оптические нутации), заключающиеся в периодическом переходе системы из одного из этих состояний в другое и обратно. Вследствие различия средних дипольных моментов этих состояний такие переходы приводят к возникновению поляризации и возбуждаемого ей электромагнитного поля, в спектрах которых имеются гармоники с частотой этих осцилляции, называемой частотой Раби. В указанной выше работе рассмотрена конкретная реализация такой квантовой системы в наногетероструктуре с квантовыми точками AlN/GaN или InN/GaN, в которой вследствие пьезоэлектрического эффекта возникает сильное внутреннее электрическое поле, приводящее к нарушению симметрии системы. Показано, что для характерных параметров таких квантовых точек и экспериментально достижимой амплитуды внешнего электрического поля, которая предполагается одинаковой во всех точках структуры, частота Раби может лежать в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазоне. Таким образом, данное устройство может служить источником когерентного излучения в этой частотной области. Более того, так как частота Раби зависит от амплитуды внешнего электрического поля (пропорциональна ей), то, изменяя величину последней, можно легко и в широких пределах перестраивать выходную частоту такого устройства. Хотя данный источник когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения, насколько известно автору заявки, и не был реализован, экспериментальное наблюдение осцилляции Раби в наногетероструктурах (C.W.Luo, K.Reimann, M.Woerner, T.Elsaesser, R.Hey and K.H.Ploog,

Phase-Resolved Nonlinear Response of a Two-Dimensional Electron Gas under Femtosecond Intersubband Excitation, Phys. Rev. Lett., v.92, №4, 2004, 047402) поддерживает уверенность в возможности его создания.

5 Недостатком данного устройства является то, что осцилляции Раби могут существовать только в течение времени, не превышающего времени релаксации поляризации T_2 , по прошествии которого они затухают. Поэтому увеличение длительности импульса внешнего электрического поля сверх величины T_2 не приводит к росту длительности импульса генерируемого поля и потому нецелесообразно. С
10 другой стороны, минимальный интервал между импульсами внешнего электрического поля должен быть порядка времени релаксации населенностей подзон T_1 , что необходимо для того, чтобы система успела прийти в свое первоначальное состояние перед приходом следующего возбуждающего импульса. Для наногетеросистем с квантовыми ямами, технология изготовления которых на сегодняшний день наиболее
15 разработана, $T_2 \lesssim 0,3$ пс и $T_1 \sim 1$ пс. Таким образом, предложенное устройство может функционировать лишь как импульсный источник терагерцового или дальнего инфракрасного излучения с большой скважностью $(T_1 + T_2)/T_2 \gtrsim 4$, что для многих приложений является неприемлемым. Другим его недостатком является то, что
20 ограничение максимальной длительности импульса величиной T_2 приводит к тому, что с его помощью возможна лишь генерация излучения с несущей частотой (равной частоте Раби), превышающей величину $1/T_2$. В то же время генерация им излучения с несущей частотой, значительно превышающей $1/T_2$, также является проблематичной, т.к.
25 для этого необходимо увеличивать амплитуду внешнего электрического поля, что может быть трудно выполнимым по техническим причинам или вообще невозможным вследствие разрушения структуры.

Задачей данного изобретения является создание достаточно мощного источника когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения на
30 полупроводниковой наногетероструктуре, способного работать в непрерывном режиме и позволяющего менять его частоту в широких пределах.

Указанный технический результат достигается тем, что в предлагаемом источнике когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения между источником
35 возбуждающих импульсов и полупроводниковой наногетероструктурой расположен фильтр в виде пластинки с периодически чередующимися прозрачными и непрозрачными полосками для достижения пространственной периодичности поляризации, возбуждаемой в активной области полупроводниковой наногетероструктуры.

40 Сущность изобретения заключается в том, что из-за пространственной периодичности возбуждаемой в активной области полупроводниковой наногетероструктуры поляризации она не будет генерировать электромагнитные волны со всеми имеющимися в ее спектре вследствие ее импульсного характера
45 частотами, а будет излучать лишь одну электромагнитную волну с частотой, определяемой условием согласования волнового вектора этой волны с пространственно периодической структурой поляризации. В результате, несмотря на импульсный характер поляризации, предлагаемое устройство будет генерировать непрерывное когерентное излучение, частота которого может перестраиваться в
50 широких пределах путем изменения характеристик пространственно периодической поляризационной структуры с помощью использования фильтров с различными параметрами.

Изобретение поясняется следующими чертежами. На фиг.1 изображена схема

предлагаемого устройства, а также используемая в тексте система координат. Фиг.1(а) представляет собой поперечное сечение устройства плоскостью, параллельной плоскости yz и пересекающей ось x в точке $x=(x_1-x_2)/2$, а фиг.1(б) является видом устройства сверху, на котором троеточие означает периодическое повторение показанного периода.

Таким образом, предлагаемое устройство содержит источник 1 возбуждающих импульсов среднего инфракрасного диапазона с длительностями порядка 100 фс, предназначенный для поляризации активной области 2.

Активная область 2 выращена, например, методом молекулярно-лучевой эпитаксии и состоит из полупроводниковой гетероструктуры, образованной многократным повторением периода, т.е. некоторой последовательности слоев с определенными толщинами и химическими составами. Параметры этой структуры приведены ниже при описании конкретного варианта выполнения устройства. В такой структуре слои, характеризующиеся меньшим значением энергии запрещенной зоны, чем окружающие их слои, играют роль потенциальных (или, как принято их называть в специальной литературе, квантовых) ям для электронов зоны проводимости. Достаточно высокая концентрация последних при этом обеспечивается допированием определенной части каждого периода структуры донорной примесью. При этом область допирования отделяется промежуточным недопированным слоем, что необходимо для уменьшения дополнительного уширения межподзонного перехода вследствие рассеяния электронов на ионизованных донорах. В квантовых ямах формируются подзоны размерного квантования электронов, каждая из которых обладает определенной энергией и волновой функцией, описывающей движение электрона поперек квантовой ямы. Вследствие различия высот левого и правого потенциальных барьеров, окружающих квантовые ямы, и несимметричного расположения допированных областей между квантовыми ямами они являются несимметричными, вследствие чего подзоны размерного квантования в них характеризуются ненулевыми и различными для различных подзон средними дипольными моментами. Поэтому две такие подзоны могут играть роль необходимой для работы предлагаемого устройства несимметричной квантовой системы.

Активная область 2 заключена между верхним и нижним слоями металла 3, высокопроводящего и химически стойкого, например Au или Cu, которые играют роль планарного волновода для ограничения генерируемого терагерцового или дальнего инфракрасного излучения по оси z и для выполнения этой задачи должны иметь достаточно большие толщины, превышающие глубину скин-слоя при лежащих в терагерцовом или дальнем инфракрасном диапазоне частотах.

Нижний из слоев металла 3 напаян на подложку 4.

Фильтр 5 служит для обеспечения пространственной периодичности возбуждения активной области 2 вдоль оси x и располагается как можно ближе к ее боковой грани в плоскости xz . Он представляет собой пластинку из материала, слабо поглощающего возбуждающее излучение с вакуумной длиной волны $\lambda \sim 10$ мкм, на которой через промежутки x_2-x_1 в вертикальном направлении (ось z) нанесены металлические полосы с шириной $2(x_3-x_2)$ каждая, которые практически полностью отражают падающее на них возбуждающее излучение. Параметры устройства должны удовлетворять неравенствам $\lambda l_y / [n(x_2-x_1)^2] < 1$ и $\lambda l_y / (n l_z^2) < 1$, где n - показатель

преломления активной области 2 (усредненный по ее периоду), l_y - ширина активной области 2 в направлении оси y , а l_z - ее высота в направлении оси z (см. фиг.1). Их

выполнение необходимо для обеспечения пространственной периодичности возбуждения на всем латеральном размере l_y активной области 2, т.е. отсутствия на нем существенного уширения формируемых фильтром 5 лучевых пучков.

В конкретном варианте выполнения устройства необходимые для поляризации активной области 2 возбуждающие импульсы генерируются в их источнике 1 (типа описанного в работе K.Reimann, R.P.Smith, A.M.Weiner, T.Elsaesser, and M.Woerner, Direct field-resolved detection of terahertz transients with amplitudes of megavolts per centimeter, Optics Letters, v.28, issue 6, 2003, p.471) с помощью нелинейного смещения в кристалле GaSe интенсивных ближних инфракрасных (несущая вакуумная длина волны примерно 800 нм) импульсов с длительностями около 25 фс от титан-сапфирового источника. В результате источник 1 излучает импульсы с несущей вакуумной длиной волны $\lambda=12,4$ мкм, длительностью 100 фс и амплитудой электрического поля E_0 до 1 МВ/см.

Активная область 2 устройства имеет размеры $l_y=l_z=10$ мкм и изготовлена на основе AlGaAs гетеросистемы. На фиг.2 показана нижняя граница зоны проводимости E_c на одном периоде активной области 2 как функция координаты z вдоль направления ее роста, а также энергии ϵ_{10} и ϵ_{20} подзон размерного квантования при нулевом значении квазиимпульса электрона в плоскости квантовой ямы $p_{||}$ и формы соответствующих им огибающих волновых функций; в качестве начала отсчета энергии выбран уровень химического потенциала. Толщина одного периода равна $l_{MQW}=59,3$ нм, и он состоит из квантовой ямы GaAs с толщиной $l_{QW}=8,5$ нм (30 монослоев), окруженной левым барьером из $Al_{0,35}Ga_{0,65}As$ с толщиной 20,3 нм (72 монослоя) и правым барьером из $Al_{0,22}Ga_{0,78}As$ с толщиной 31 нм (108 монослоев). Активная область 2 имеет полную толщину $l_z=10$ мкм, и она состоит из 168 повторений показанного на фиг.2 периода. Усредненный по периоду показатель преломления n активной области 2 равен 3,15. Разделяющие соседние квантовые ямы барьеры достаточно высоки и широки, так что каждая квантовая яма может рассматриваться отдельно от других, и формирования мини-зон не происходит. Левая часть левого барьера, имеющая толщину 10 нм (18 монослоев), допируется Si до концентрации 5×10^{17} см⁻³ для обеспечения достаточного количества электронов в квантовой яме. Вычисление энергии подзон с учетом влияния самосогласованного кулоновского потенциала, возникающего вследствие пространственного разделения ионизованных доноров и электронов, т.е. одновременное решение уравнения Шредингера и Пуассона, с помощью стандартной программы Г.Снайдера (G.Snider) дает, что при температуре $T=15$ К в каждой квантовой яме возникают только две подзоны размерного квантования с $\epsilon_{10}=-17,54$ мэВ и $\epsilon_{20}=82,53$ мэВ. При этом концентрация электронов в каждой квантовой яме на единицу ее площади примерно равняется $4,7 \times 10^{11}$ см⁻² и сосредоточена практически полностью в первой подзоне. В пренебрежении импульсами фотонов по сравнению с квазиимпульсом электронов и небольшой разницей эффективных масс электронов при их движении в плоскости квантовой ямы можно считать, что подзоны играют роль квантовых уровней с частотой перехода между ними $\omega_{21}=(\epsilon_{20}-\epsilon_{10})/\hbar$, примерно соответствующей вакуумной длине волны $\lambda=12,4$ мкм, т.е. резонансной с частотой возбуждающих импульсов.

Дипольный момент перехода между подзонами $d_{12} \equiv -ez_{12}z^0$, где $e>0$ - элементарный заряд; $z_{12} \approx 2,18$ нм - найденный с помощью компьютерных вычислений матричный элемент перехода; z^0 - единичный вектор вдоль оси z . Разница средних дипольных моментов подзон $d_{11}-d_{22} \equiv -e(z_{11}-z_{22})z^0$, где разница диагональных матричных

элементов $z_{11}-z_{22}\approx-3,1$ нм.

Толщины верхнего и нижнего слоев металла 3 (в данном случае Au) должны быть сделаны большими 50 нм.

Подложка 4 выполняется из GaAs.

5 Фильтр 5 представляет собой пластинку из GaAs, на которой через промежутки x_2-x_1 в вертикальном направлении (ось z) нанесены полосы из Au шириной $2(x_3-x_2)$ каждая. Оптимальные значения $x_{1,2,3}$ для генерации терагерцового или дальнего инфракрасного излучения с различными частотами приведены ниже. Легко проверить, 10 что для указанных l_y, l_z, n и всех используемых величин разности x_2-x_1 неравенства $l_y \lambda_y / [n(x_2-x_1)^2] < 1$ и $\lambda_{l_y} / (nl_z^2) < 1$, согласно сказанному выше, обеспечивающие пространственную периодичность возбуждения поляризации на всем латеральном 15 размере активной области 2, действительно выполняются.

15 Устройство работает следующим образом. При температуре образца $T=15$ К время релаксации поляризации T_2 примерно равно 100 фс, а время релаксации населенностей подзон $T_1=550$ фс, как было измерено в работе R.A.Kaindl, K.Reimann, M.Woerner, T.Elsaesser, R.Hey and K.H.Ploog, Homogeneous broadening and excitation-induced dephasing 20 of intersubband transitions in a quasi-two-dimensional electron gas, Phys. Rev. B, v.63, №16, 2001, 161308(R) для структуры, подобной рассматриваемой здесь. Расчеты показывают, что мощность предлагаемого устройства в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазоне максимальна, если длительности возбуждающих импульсов примерно равны T_2 , а частота Раби $\omega_R \equiv |d_{12} E_0| / \hbar$ сама лежит в этой спектральной 25 области и удовлетворяет соотношению $T_2 \omega_R / (2\pi) \sim 1$. Последнее означает, что в течение возбуждающего импульса происходит примерно одна осцилляция Раби, т.е. электроны один раз переходят из нижней подзоны в верхнюю и возвращаются обратно. Вследствие различия средних дипольных моментов подзон это приводит к 30 возникновению поляризации, содержащей низкочастотную компоненту. Последняя представляет собой последовательность импульсов с длительностями T_2 , каждый из которых состоит из одного колебания. Низкочастотная компонента поляризации приводит к возникновению в активной области 2 соответствующей низкочастотной плотности тока, являющейся периодической функцией времени с периодом $\tau = T_2 + \tau_1$, 35 где τ_1 - длительность межимпульсного интервала. Разложим ее в ряд Фурье. В нем будут присутствовать гармоники с частотами $2\pi q / \tau$, где q - целое число. Если бы возбуждаемая поляризация была однородна в пространстве, то все эти гармоники генерировали бы электромагнитные волны с соответствующими частотами (и 40 определяемыми ими продольными волновыми числами k_q) практически с одинаковой эффективностью. Суммирование этих волн на выходе устройства привело бы к импульсному выходному сигналу с длительностями импульсов T_2 , межимпульсным интервалом τ_1 и несущей частотой, равной частоте Раби.

45 Однако, поскольку в предлагаемом устройстве между источником 1 возбуждающих импульсов и активной областью 2 установлен фильтр 5, возбуждаемая в активной области 2 поляризация является периодической в пространстве (фиг.1). Тогда излучение от активной области 2 будет во многом аналогично излучению от фазированной антенной решетки, и можно показать, что если $x_2-x_1 = \pi / \text{Re}k_g$ и $x_3 =$ 50 $2\pi / \text{Re}k_q$, т.е. часть пространственного периода поляризации, на которой поляризация отлична от нуля, равна половине длины волны, а сам период - одной длине волны гармоники электромагнитного поля с некоторым q , то лишь эта гармоника и будет излучаться эффективно. В результате на выходе устройства не будут суммироваться

волны с различными частотами, а будет лишь одна волна с частотой $2\pi q/\tau$, определяемой величинами x_2-x_1 и x_3 , т.е. непрерывный выходной сигнал. Изменяя x_1 , x_2 и x_3 , можно добиться генерации гармоник с различными q , т.е. менять выходную частоту устройства в широких пределах. Таким образом, установка между источником возбуждающих импульсов 1 и активной областью 2 фильтра 5 с варьлируемыми параметрами позволяет достичь требуемого технического результата, заключающегося в создании частотно-перестраиваемого непрерывного источника когерентного терагерцового или дальнего инфракрасного излучения на полупроводниковой наногетероструктуре.

Из указанного выше условия оптимальной работы предлагаемого источника $T_2\omega_R/(2\pi)\sim 1$ можно получить оценку на амплитуду электрического поля возбуждающих импульсов $E_0\sim 200$ кВ/см. Согласно сказанному выше, источник 1 способен обеспечить генерацию возбуждающих импульсов с такими характеристиками.

Вследствие субволнового характера образованного слоями металла 3 двойного плазмонного волновода для терагерцового и дальнего инфракрасного излучения коэффициент отражения последнего на его торцевых гранях (по мощности) значительно превышает френелевское значение и лежит в пределах $0,54\div 0,9$ в зависимости от соотношения генерируемой длины волны и размеров волновода (S.Kohen, B.S.Williams and Q.Hu, Electromagnetic modelling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators, J. Appl. Phys., v.97, №5, 2005, 053106). Для нижеследующих оценок выходной мощности рассматриваемого устройства будет предполагаться наихудший случай, когда указанный коэффициент равен 0.9 и, следовательно, доля выводимой из активной области 2 мощности минимальна.

На фиг.3 изображены зависимости расчетной мощности устройства P_q от его продольной длины вдоль оси x для гармоник с различными q . При этом для каждого q величина x_1 выбрана равной $0,5\pi/Rek_q$ для обеспечения симметрии устройства относительно делящей его пополам плоскости yz , а величины $x_2-x_1=\pi/Rek_q$ и $x_3=2\pi/Rek_q$, т.е. равны своим оптимальным значениям для данного q . На фиг.3(а) показаны величины P_q для $\tau_1=T_1$ и $q=1$ (выходная вакуумная длина волны 195 мкм, $x_1=26,4$ мкм, $x_2=79,1$ мкм, $x_3=105,4$ мкм), $q=2$ (97,5 мкм, $x_1=9,5$ мкм, $x_2=28,6$ мкм, $x_3=38,1$ мкм), $q=3$ (65 мкм, $x_1=5,6$ мкм, $x_2=16,7$ мкм, $x_3=22,3$ мкм) и $q=4$ (48,75 мкм, $x_1=3,9$ мкм, $x_2=11,8$ мкм, $x_3=15,7$ мкм). На фиг.3(б) изображены те же величины, но при $\tau_1=2T_1$ и $q=1$ (360 мкм, $x_1=65,7$ мкм, $x_2=197$ мкм, $x_3=262,7$ мкм), $q=2$ (180 мкм, $x_1=23,3$ мкм, $x_2=70$ мкм, $x_3=93,3$ мкм), $q=3$ (120 мкм, $x_1=12,8$ мкм, $x_2=38,3$ мкм, $x_3=51,1$ мкм), $q=4$ (90 мкм, $x_1=8,5$ мкм, $x_2=25,6$ мкм, $x_3=34,2$ мкм), $q=5$ (72 мкм, $x_1=6,4$ мкм, $x_2=19,1$ мкм, $x_3=25,4$ мкм) и $q=6$ (60 мкм, $x_1=5,1$ мкм, $x_2=15,2$ мкм, $x_3=20,2$ мкм).

Из фиг.3 следует, что оптимальная длина устройства l_x равна нескольким сантиметрам и определяется $1/Imk_g$, т.е. длиной поглощения генерируемого излучения. Из него также видно, что для близких частот максимальные P_q в случае $\tau_1=T_1$ больше, чем в случае $\tau_1=2T_1$. Это является отражением того факта, что при $\tau_1=T_1$ скважность возбуждения примерно в два раза меньше, чем в случае $\tau_1=2T_1$. Таким образом, оптимальным для данного устройства является минимально возможный интервал между возбуждающими импульсами, равный времени релаксации населенностей T_1 .

Для демонстрации того, что предлагаемое устройство действительно обеспечивает непрерывное выходное излучение при его импульсном возбуждении, рассмотрим случай $\tau_1=T_1$ и фильтр 5, для которого $x_2-x_1=\pi/Rek_1$ и $x_3=2\pi/Rek_1$, т.е. фильтр 5,

оптимальный для генерации первой гармоники. Тогда вычисления дают, что $P_2/P_1 \approx 1,4 \times 10^{-5}$, $P_3/P_1 \approx 5,9 \times 10^{-6}$ и $P_4/P_1 \approx 2,4 \times 10^{-6}$. Таким образом, мощности на других гармониках пренебрежимо малы по сравнению с мощностью на первой гармонике, которая таким образом доминирует в выходном сигнале, приводя к его непрерывности во времени.

Общая тенденция уменьшения максимальных P_q с ростом q объясняется увеличением потерь терагерцового или дальнего инфракрасного излучения $|Imk_q|$ с ростом его частоты (т.е. q) в образованном слоями металла 3 планарном волноводе.

Из фиг.3 видно, что, работая в непрерывном режиме, предлагаемое устройство может обеспечить выходную мощность $\sim 0,8$ Вт, которая в несколько раз больше, чем мощность терагерцового квантового каскадного лазера при работе в непрерывном режиме ($0,1 \div 0,2$ Вт) и даже в пике при работе в импульсном режиме ($0,2 \div 0,3$ Вт), см. B.S.Williams, Terahertz quantum-cascade lasers, Nature Photonics, v.1, 2007, pp.517-525.

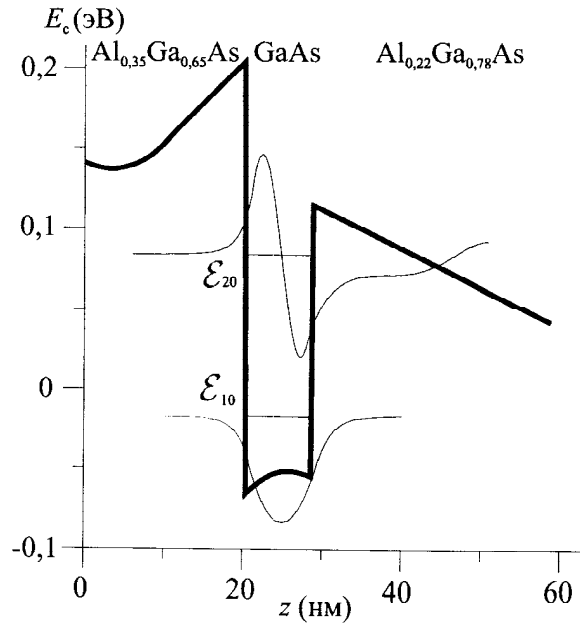
Предложенное устройство, кроме того, позволяет существенно перестраивать частоту генерации в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазоне, что для квантового каскадного терагерцового лазера является недостижимым. Предлагаемое устройство также обеспечивает значительно большую выходную мощность, чем двухчастотный квантовый каскадный лазер среднего инфракрасного диапазона, генерирующий излучение разностной частоты с мощностью, не превышающей даже в импульсном режиме 7 мкВт (M.A.Belkin, F.Capasso, A.Belyanin, D.L.Sivco, A.Y.Cho, D.C.Oakley, C.J.Vineis, and G.W.Turner, Terahertz quantum-cascade-laser source based on intracavity difference-frequency generation, Nature Photonics, v.1, 2007, pp.288-292, патент US №7974325, МПК⁸ H01S 5/00 (20060101), опубл. 2011 г.), и, в отличие от него, позволяет значительно перестраивать выходную частоту.

В отличие от устройства-прототипа, являющегося импульсным источником терагерцового и дальнего инфракрасного излучения, предлагаемое устройство является непрерывным источником в этом частотном диапазоне. Кроме того, устройство-прототип способно генерировать лишь импульсы, несущая частота которых превышает обратное время релаксации поляризации $1/T_2$. Предлагаемое же устройство может излучать импульсы с несущей частотой как больше, так и меньше $1/T_2$.

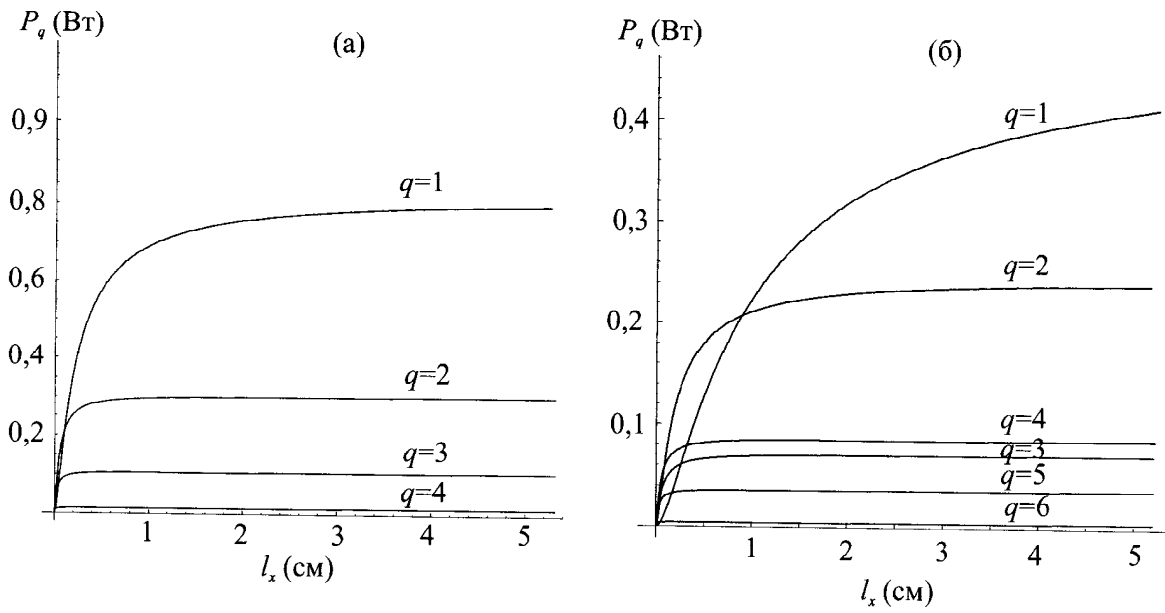
Достоинством предлагаемого устройства является также то, что, в отличие от квантовых каскадных лазеров, оно основано на сравнительно простой наногетероструктуре, изготовление которой не требует применения сверхсложного технологического оборудования.

Формула изобретения

Частотно-перестраиваемый источник когерентного терагерцового и дальнего инфракрасного излучения на основе полупроводниковой наногетероструктуры, возбуждаемый импульсами среднего инфракрасного диапазона, отличающийся тем, что в нем между источником возбуждающих импульсов и полупроводниковой наногетероструктурой расположен фильтр в виде пластинки с периодически чередующимися прозрачными и непрозрачными полосками для достижения пространственной периодичности поляризации, возбуждаемой в активной области полупроводниковой наногетероструктуры.



Фиг. 2



Фиг. 3