

Моделирование эффективности электрической накачки квантово-каскадного терагерцевого лазера при неоднородном питании током

А.К.Долгов, Д.В.Ушаков, А.А.Афоненко, И.Н.Дюжиков,
И.А.Глинский, Д.С.Пономарев, Р.А.Хабибуллин

Проведено исследование эффективности электрической накачки квантово-каскадных лазеров (ККЛ) терагерцевого (ТГц) диапазона с полосковой геометрией в зависимости от числа и расположения контактных площадок. На основе численного моделирования распределения электрического потенциала в активной области ТГц ККЛ определены необходимые толщины слоев верхней металлизации ТГц ККЛ для минимизации падения напряжения вдоль лазерной структуры в случае неоднородного питания током. Установлено, что при центральном расположении контакта эффективность электрической накачки существенно выше, чем в случае расположения контактных площадок близко к краям лазерной структуры. Из рассчитанной зависимости интегральной мощности ТГц ККЛ от толщины верхнего металлического слоя показано, что для эффективной инжекции тока необходимо располагать контактные площадки на расстоянии менее 0.5 мм друг от друга.

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, терагерцевый диапазон, электрическая накачка, активная область.

1. Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) на основе гетеросистемы GaAs/AlGaAs являются компактными твердотельными источниками излучения в диапазоне 1.2–5.4 ТГц [1, 2], причем частотный диапазон может быть расширен до 10 ТГц за счет использования соединений ртути HgCdTe [3]. Достигнутая выходная мощность ТГц ККЛ около 1.8 Вт при температуре кипения жидкого азота [4] делает данные источники весьма перспективными для визуализации и зондирования удаленных объектов [5, 6]. Кроме того, возможность для ТГц ККЛ работать в непрерывном режиме при спектральной ширине линии генерации ~ 10 кГц [7] позволяет использовать их в качестве локального осциллятора для гетеродинного детектирования [8], а также применять ТГц ККЛ в качестве источника для высокоразрешающей спектроскопии [9–11].

Применение ТГц ККЛ для различных приложений накладывает определенные требования на работу лазера

и зачастую определяет дизайн активной области и архитектуру резонатора. Например, при использовании ККЛ в системах терагерцевой визуализации необходима большая выходная мощность и улучшенная однородность фазового фронта и несимметричность лазерного пучка. В этом случае, как правило, применяются дизайны активной области с малыми значениями пороговых токов и напряжений (например, дизайн bound-to-continuum [12]), а в качестве волновода используется так называемый поперечный плазмонный волновод для улучшения диаграммы направленности излучения в дальнем поле. При использовании ТГц ККЛ в качестве источника для спектроскопии необходимо обеспечить работу лазера в одномодовом режиме генерации с максимально возможным диапазоном перестройки частоты излучения [13–15].

Традиционно для реализации одномодового режима генерации в ТГц ККЛ применяют два подхода: 1) формирование распределенной обратной связи (РОС) [16–18]; 2) использование двухсекционных связанных резонаторов Фабри–Перо [18–20]. Использование РОС в ТГц ККЛ позволило обеспечить подавление боковых мод на 20–30 дБ и существенно уменьшить расходимость пучка – до 10° [21]. В лазерах с двухсекционными связанными резонаторами Фабри–Перо подавление боковых мод составляет более 25 дБ, и появляется возможность перестройки частоты излучения лазера примерно на 5 и 12 ТГц в непрерывном и импульсном режиме соответственно за счет накачки одной секции резонатора излучением с длиной волны ~ 800 нм [22]. При этом в обоих случаях возникает проблема с разваркой лазерной структуры ТГц ККЛ из-за более сложной архитектуры резонатора, поскольку характерные размеры, необходимые для разварки «питающей» проволоочки диаметром ~ 30 мкм, могут превышать размеры топологических элементов волноводной структуры. Например, для реализации ТГц ККЛ с РОС третьего порядка [23] контактная площадка для разварки была

А.К.Долгов, Д.С.Пономарев. Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г.Мокерова РАН, Россия, 117105 Москва, Нагорный пр., 7, стр. 5;

Д.В.Ушаков, А.А.Афоненко. Белорусский государственный университет, Беларусь, 220030 Минск, просп. Независимости, 4

И.Н.Дюжиков. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

И.А.Глинский. МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78, стр. 4

Р.А.Хабибуллин. Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г.Мокерова РАН, Россия, 117105 Москва, Нагорный пр., 7, стр. 5; Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики» РАН», Россия, Нижегородская обл., 603087 Кстовский район, д. Афонино, Академическая ул., 7
e-mail: khabibullin@isvch.ru

вынесена на периферию, что приводит к одностороннему растеканию тока по лазерной структуре. При создании поверхностно-излучающих ТГц ККЛ на поверхности структуры формируется система отверстий в металлических и контактных слоях для эффективного вывода ТГц излучения в свободное пространство, что приводит к необходимости разварки отдельно стоящих контактных площадок [24,25]. Аналогичная ситуация возникает при создании фазированных лазерных решеток ТГц ККЛ, позволяющих существенно улучшить излучательную эффективность и достигнуть рекордных значений выходной мощности – более 2 Вт, что требует электрического питания контактных площадок, расположенных в периферийной части лазерной решетки [26,27]. Это приводит к неоднородной инжекции тока в активную область ТГц ККЛ из-за электрического сопротивления верхней обкладки двойного металлического волновода, которая традиционно имеет толщину 200–400 нм. Кроме того, вынесенные на периферию контактные площадки имеют ограничение по площади, что позволяет их разварить одной-двумя проволоками и, как следствие, ограничивает величину пропускаемого тока в такой системе.

Цель настоящей работы – исследование эффективности электрической накачки ТГц ККЛ в зависимости от числа и расположения контактных площадок, а также определение необходимой толщины верхнего металлического слоя ТГц ККЛ для минимизации падения напряжения вдоль лазерной структуры в случае неоднородного питания током.

2. Моделирование распределения электрического потенциала в ТГц ККЛ

Для оценки эффективности электрической накачки активной области ТГц ККЛ в зависимости от расположения питающих проволочек, а также от толщины слоя металлизации верхней обкладки волновода проведено моделирование распределения электрического потенциала в лазерной структуре при приложении внешнего напряжения методом конечных элементов. Для этого в программном пакете Comsol Multiphysics (модуль Electric Currents) была построена модель ТГц ККЛ, которая схематически изображена на рис.1.

Модель ТГц ККЛ построена на основе экспериментального образца, описанного в работах [28–31]. Данная модель включает в себя токопроводящую подложку GaAs

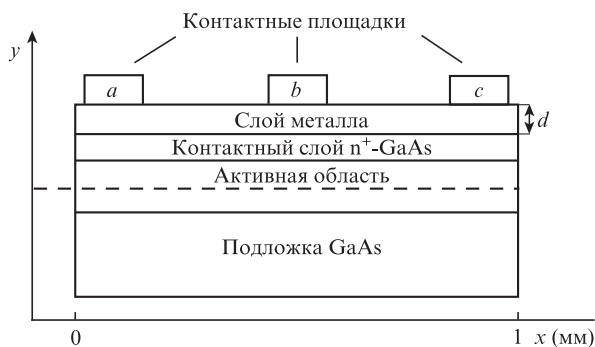


Рис.1. Схематическое изображение лазерной структуры ТГц ККЛ с контактными площадками. Штриховой линией обозначено сечение активной области, которое использовалось для расчета распределения электрического потенциала.

толщиной 120 мкм, активную область на основе гетероструктуры GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As толщиной 10 мкм, контактный слой n⁺-GaAs толщиной 100 нм и металлический слой из золота толщиной d от 150 до 1900 нм, на котором располагаются контактные площадки. Латеральный размер моделируемой структуры соответствует экспериментальному образцу ТГц ККЛ с длиной резонатора 1 мм и шириной 100 мкм. Выбор геометрии данной модели обусловлен еще и тем, что эффекты неоднородного питания лазерной полоски длиной 1 мм будут только усиливаться с увеличением длины резонатора.

Проводимость σ входящих в модель слоев определялась следующим образом. Проводимость токопроводящей подложки GaAs была рассчитана как $\sigma_{\text{GaAs}} = en\mu_e = 1.6 \times 10^5 \text{ См/м}$, где электронная подвижность $\mu_e = 1 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{В}$ для криогенных температур при концентрации легирования GaAs кремнием $n = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Проводимость активной области ТГц ККЛ оценивалась исходя из сопротивления R изготовленного лазера в рабочей точке, которое составило 12 Ом, что соответствует $\sigma = L/(RS) = 8.3 \text{ См/м}$, где L – толщина активной области, а S – площадь поперечного сечения лазерной полоски прямоугольной формы длиной 1 мм и шириной 100 мкм. Поскольку контактный слой и токопроводящая подложка сделаны из одного материала, то проводимость контактного слоя n⁺-GaAs равна проводимости, рассчитанной для токопроводящей подложки GaAs. Проводимость металлического слоя из золота оценивалась из температурной зависимости удельного сопротивления золота, измеренного в работах [32,33]. При криогенных температурах $\rho_{\text{Au}} = 1 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$, что эквивалентно $\sigma_{\text{Au}} = 1/\rho_{\text{Au}} = 1 \times 10^8 \text{ См/м}$.

Для электрического питания моделируемой лазерной структуры использовались три контактные площадки a , b , c с латеральным размером 50 мкм (см. рис.1). Для определения оптимальных режимов питания активной области были рассмотрены следующие варианты: напряжение подавалось на контактную площадку c , контактную площадку b , контактные площадки b и c , контактные площадки a , b и c .

Полученные зависимости распределения электрического потенциала в активной области ТГц ККЛ (сечение оси y на рис.1) были пересчитаны в распределения тока вдоль длины лазерной полоски. Для этого использовалась экспериментальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) изготовленного ТГц ККЛ с резонансно-фононным дизайном и частотой генерации около 3.3 ТГц [34].

3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 представлены распределения электрического потенциала и тока вдоль длины лазерной структуры при подаче напряжения на одну контактную площадку, расположенную на краю (контактная площадка c). При подаче напряжения на контакт c распределение электрического потенциала в активной области ТГц ККЛ имеет спадающий характер. По мере удаления от контакта c происходит падение напряжения, что в первую очередь связано с сопротивлением металлического слоя из золота. При толщине слоя золота $d = 150 \text{ нм}$ падение напряжения ΔU на противоположной от контакта c стороне структуры составляет 2.05 В. Такое падение напряжения соответствует падению тока инжекции в активной обла-

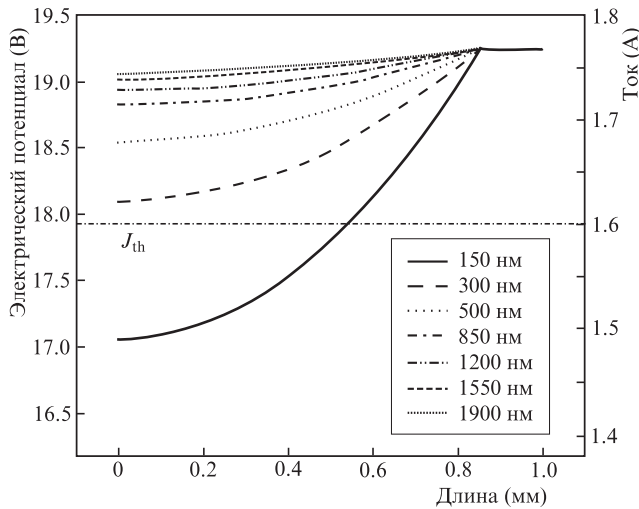


Рис.2. Распределения электрического потенциала и тока в ТГц ККЛ с контактной площадкой, расположенной на краю структуры (контакт *c*), и толщиной слоя золота от 150 до 1900 нм. Штрихпунктирной линией показано значение порогового тока J_{th} .

сти с 1.76 до 1.58 А, что было определено из экспериментальной ВАХ изготовленного ТГц ККЛ. В данном случае около 50% площади активной области находится в допорогового режиме инжекции, когда ток инжекции меньше порогового тока $J_{th} = 1.6$ А. Таким образом, при $d = 150$ нм эффективность электрической накачки низкая, что приводит к существенному уменьшению выходной мощности ТГц ККЛ.

Из рис.2 видно, что при увеличении толщины слоя золота происходит уменьшение падения напряжения на противоположном от контакта *c* крае полоски. Например, при $d = 300, 500$ и 850 нм падение напряжения ΔU составляет 1, 0.65 и 0.35 В соответственно. При толщинах слоя золота более 850 нм имеет место выравнивание электрического потенциала по всей структуре, что соответствует случаю однородного питания ТГц ККЛ.

В случае подачи напряжения на контактную площадку, расположенную в центральной области структуры (контактная площадка *b*), распределение электрического потенциала и тока в активной области ТГц ККЛ показано на рис.3. При толщине слоя золота $d = 150$ нм падение

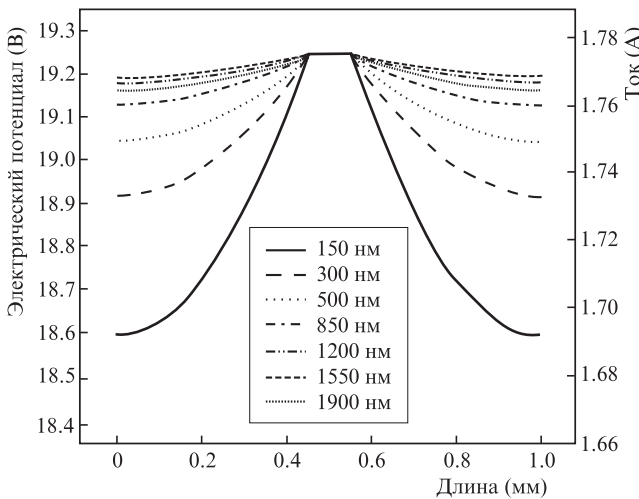


Рис.3. Распределения электрического потенциала и тока в ТГц ККЛ с контактной площадкой в центральной области (контакт *b*) и толщиной слоя золота от 150 до 1900 нм.

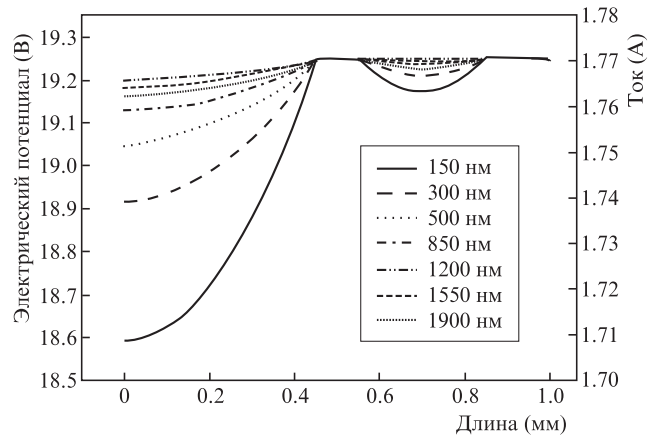


Рис.4. Распределения электрического потенциала и тока в ТГц ККЛ с двумя контактными площадками *b* и *c* и толщиной слоя золота от 150 до 1900 нм.

напряжения ΔU на краях составляет 0.6 В, что эквивалентно падению тока инжекции на 80 мА. Увеличение d приводит к уменьшению ΔU , которое для $d > 500$ нм составляет менее 0.1 В. При этом для всех исследуемых значений d для всей площади активной области ток инжекции превышает пороговый ток $J_{th} = 1.6$ А. Таким образом, при центральном расположении контакта эффективность электрической накачки существенно выше, чем в случае расположения контактной площадки на краю лазерной полоски.

В случае, когда напряжение подавалось на две контактные площадки, расположенные по центру и близко к краю лазерной структуры (контактные площадки *b* и *c*) распределение электрического потенциала и тока вдоль структуры представлено на рис.4. Из полученного распределения видно, что между двумя контактами образуется область с незначительным падением напряжения, менее 0.1 В. При этом, как и в случае одиночной контактной площадки *b*, на противоположном крае лазерной полоски происходит падение напряжения $\Delta U = 0.6$ В при $d = 150$ нм. Этот подход можно использовать при создании мощных лазеров для уменьшения тепловой нагрузки излучательного торца. Подбирая расстояние между контактом *b* и излучательным торцом, а также варьируя толщину слоя металлизации, можно добиться существенного уменьшения плотности тока в области излучательного торца и, следовательно, уменьшения джоулева разогрева данной области.

Для сравнения с описанными выше случаями неоднородного питания ТГц ККЛ на рис.5 приведено распределение электрического потенциала и тока вдоль длины лазерной структуры в случае подачи напряжения на три контактные площадки, расположенные по краям и в центре структуры (контактные площадки *a*, *c* и *b*). При подаче напряжения на три контактные площадки наблюдается незначительное падение напряжения в активной области между контактными площадками, что является приближенным случаем однородного питания ТГц ККЛ с наибольшей эффективностью электрической накачки. Приведенные расчеты наглядно демонстрируют, что использование контактных площадок, периодически расположенных на поверхности структуры, может привести к продуманной модуляции инжекции тока и, как следствие, модуляции усиления в активной области ТГц ККЛ. Для увеличения глубины модуляции инжекции тока не-

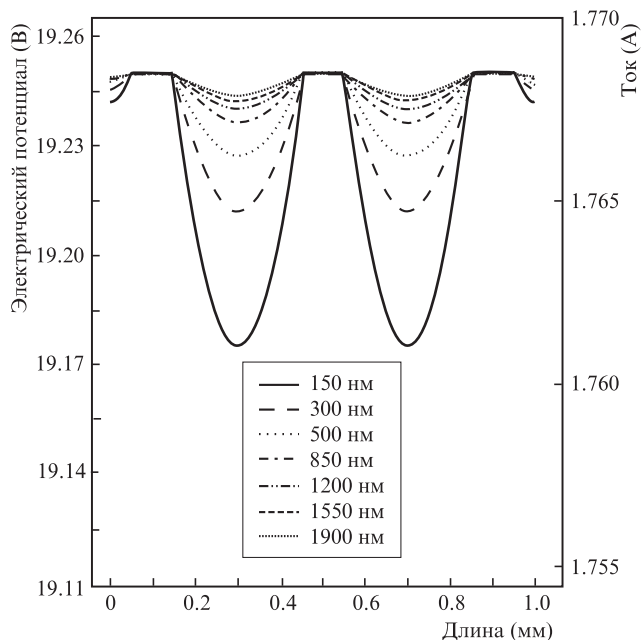


Рис.5. Распределения электрического потенциала и тока в ТГц ККЛ с тремя контактными площадками *a*, *b*, *c* и толщиной слоя золота от 150 до 1900 нм.

обходимо электрически изолировать контактные площадки друг от друга, что потребует вытравливания слоя металлизации и контактного слоя p^+ -GaAs.

Для оценки влияния неоднородности электрического питания на выходную мощность излучения ТГц ККЛ была построена зависимость интегральной мощности от толщины слоя золота d для рассмотренных выше случаев расположения контактных площадок. Для этого была использована экспериментальная зависимость интегральной мощности P от напряжения смещения (см. вставку на

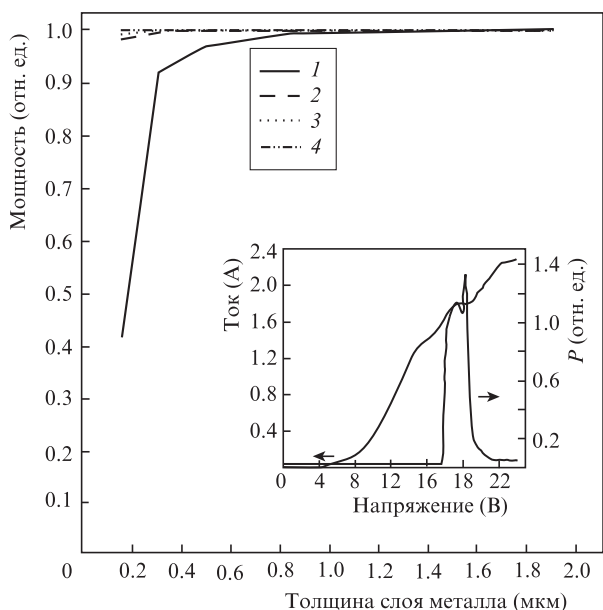


Рис.6. Зависимость интегральной мощности от толщины верхнего слоя металлизации для четырех вариантов расположения контактных площадок: 1 – контактная площадка *c*; 2 – контактная площадка *b*; 3 – две контактные площадки *b* и *c*; 4 – три контактные площадки *a*, *b* и *c*. На вставке приведены ВАХ и зависимость интегральной мощности от напряжения смещения для изготовленного ТГц ККЛ при 4.2 К.

рис.6), что позволило оценить влияние падения напряжения ΔU на величину P .

Из рис.6 видно, что при расположении контактной площадки на краю структуры (контактная площадка *c*) и использовании тонкого слоя золота ($d = 150$ нм) наблюдается резкое падение интегральной мощности по сравнению со случаем однородного электрического питания. Падение напряжения вдоль лазерной структуры приводит к уменьшению выходной мощности на 50%–60% при толщине слоя металлизации $d = 150$ –200 нм. Для увеличения эффективности электрической накачки необходимо увеличить толщину d до 850 нм и более, что приведет к незначительному, менее чем на 5%, уменьшению выходной мощности по сравнению со случаем однородного электрического питания. Отметим, что использование толщин металлизации более 850 нм требует дополнительных технологических операций (например, гальванического осаждения золота), что будет усложнять «маршрут» изготовления ТГц ККЛ с учетом большой глубины мезатравления – примерно 10 мкм гребневых мезаполосок [35–37]. Однако наши расчеты показывают, что при толщинах металлизации около 500 нм, которые можно получить при использовании традиционной взрывной (lift-off) литографии, падение выходной мощности не существенно и составляет менее 10%. Кроме того, из рис.6 следует, что при использовании одной контактной площадки, расположенной в центре (площадка *b*), и трех контактных площадок (площадки *a*, *b* и *c*) выходные мощности для всех исследуемых толщин d имеют близкие значения при длине лазерной структуры 1 мм. Таким образом, при размещении контактной площадки в центральной части структуры ТГц ККЛ эффективная инжекция тока при толщине слоя золота более 150 нм происходит на расстоянии 0.5 мм от контакта. Данный параметр можно использовать при создании ТГц ККЛ с длинным резонатором (от 2 мм и более), при этом для электрической накачки расстояние между питающими проволочками на поверхности структуры не должно превышать 0.5 мм.

4. Заключение

В работе проведено исследование эффективности электрической накачки ТГц ККЛ для четырех вариантов электропитания системы. При подаче напряжения на одну контактную площадку, расположенную на краю лазерной структуры, падение напряжения вдоль волновода длиной 1 мм составляет около 2 В, что приводит к низкой эффективности электрической накачки и уменьшению выходной мощности на 60% при толщине верхнего металлического слоя 150 нм. В случае подачи напряжения на одну контактную площадку, расположенную в центре лазерной структуры длиной 1 мм, эффективность электрической накачки сравнима с таковой в случаях подачи напряжения на две и три контактные площадки. Таким образом, если контактная площадка ТГц ККЛ находится в периферийной части прибора, то для эффективной электрической накачки необходимо использовать верхние металлические слои толщиной более 850 нм. При толщине слоев менее 500 нм и расположении контактных площадок в центральной области структуры для эффективной инжекции тока необходимо располагать контактные площадки на расстоянии менее 0.5 мм друг от друга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00493).

1. Walther C., Fischer M., Scalfari G., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (13), 131122 (2007).
2. Wienold M., Röben B., Lü X., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **107** (20), 202101 (2015).
3. Ushakov D., Aфоненко А., Khabibullin R., et al. *Opt. Express*, **28** (17), 25371 (2020).
4. Li L.H., Chen L., Freeman J.R., et al. *Electron. Lett.*, **53** (12), 799 (2017).
5. Sterczewski L.A., Westberg J., Yang Y., et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **6** (6), 766 (2019).
6. Lim Y.L., Bertling K., Taimre T., et al. *Opt. Express*, **27** (7), 10221 (2019).
7. Barkan A., Tittel F.K., Mittleman D.M., et al. *Opt. Lett.*, **29** (6), 575 (2004).
8. Ren Y., Hayton D.J., Hovenier J.N., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **101** (10), 101111 (2012).
9. Hübers H.W., Richter H., Wienold M. *J. Appl. Phys.*, **125** (15), 151401 (2019).
10. Alam T., Wienold M., Lu X., et al. *Opt. Express*, **27** (4), 5420 (2019).
11. Roben B., Lu X., Hempel M., et al. *Opt. Express*, **25** (14), 16282 (2017).
12. Faist J., Beck M., Aellen T., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2), 147 (2001).
13. Lee A.W.M., Williams B.S., Kumar S., et al. *Opt. Lett.*, **35** (7), 910 (2010).
14. Kundu I., Dean P., Valavanis A., et al. *ACS Photonics*, **5** (7), 2912 (2018).
15. Hempel M., Röben B., Schrottke L., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **108** (19), 191106 (2016).
16. Williams B.S., Kumar S., Hu Q., et al. *Opt. Lett.*, **30** (21), 2909 (2005).
17. Wienold M., Tahraoui A., Schrottke L., et al. *Opt. Express*, **20** (10), 11207 (2012).
18. Kumar S., Williams B.S., Qin Q., et al. *Opt. Express*, **15** (1), 113 (2007).
19. Höfling S., Heinrich J., Reithmaier J.P., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (24), 241126 (2006).
20. Li H., Manceau J.M., Andronico A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **104** (24), 241102 (2014).
21. Biasco S., Garrasi K., Castellano F., et al. *Nat. Commun.*, **9**, 1122 (2018).
22. Hempel M., Röben B., Niehle M., et al. *AIP Advances*, **7** (5), 055201 (2017).
23. Wienold M., Röben B., Schrottke L., et al. *Opt. Express*, **22** (3), 3334 (2014).
24. Jin Y., Gao L., Chen J., et al. *Nat. Commun.*, **9**, 1407 (2018).
25. Liang Y., Wang Z., Wolf J., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **114** (3), 031102 (2019).
26. Jin Y., Reno J.L., Kumar S. *Optica*, **7**, 708 (2020).
27. Jin Y., Zhu O., Reno J.L., Kumar S. *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 131103 (2020).
28. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С. и др. *ФТП*, **52** (11), 1268 (2018).
29. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Клочков А.Н. и др. *ФТП*, **51** (4), 540 (2016).
30. Глинский И.А., Зенченко Н.В., Мальцев П.П. *Российский технологический журнал*, **4** (3), 27 (2016).
31. Волков О.Ю., Дюжиков И.Н., Логунов М.В. и др. *Радиотехника и электроника*, **63** (9), 981 (2018).
32. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **48** (11), 1005 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (11), 1005 (2018)].
33. Khabibullin R., Ushakov D., Aфоненко А., et al. *Proc. SPIE*, **11066**, 1106613 (2018).
34. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **49** (10), 913 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (10), 913 (2019)].
35. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Павлов А.Ю. и др. *ФТП*, **50** (10), 1377 (2016).
36. Иконников А.В., Маремьянин К.В., Морозов С.В. и др. *Письма в ЖТФ*, **43** (4), 362 (2016).
37. Khabibullin R., Ushakov D., Aфоненко А., et al. *Proc. SPIE*, **11022**, 1102204 (2019).