

09.3;07.3

## Новая схема синхронизации фаз в квантово-каскадном лазере для генерации разностной частоты в терагерцевом диапазоне

© Г.М. Савченко, Г.С. Соколовский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: gms@mail.ioffe.ruПоступило в Редакцию 25 декабря 2023 г.  
В окончательной редакции 22 января 2024 г.  
Принято к публикации 1 февраля 2024 г.

Предложена конструкция двухчастотного квантово-каскадного лазера, обеспечивающая синхронизацию фаз при генерации разностной частоты в терагерцевом диапазоне. Особенностью предложенной конструкции является новый подход к обеспечению синхронизма фаз, при котором волноводом для разностной гармоники является подложка квантово-каскадного лазера.

**Ключевые слова:** терагерцевое излучение, генерация разностной частоты, квантово-каскадный лазер, синхронизация фаз.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.10.57703.19853

Электромагнитное излучение терагерцевых (THz) частот привлекает внимание исследователей широтой области своего применения, которая связана с его высокой проникающей способностью и низкой по сравнению с рентгеновским излучением ионизирующей активностью. THz-излучение находит применение в аналитической химии, диагностической медицине и фармацевтике, в системах контроля качества, мониторинга и безопасности, беспроводной связи, астрономии и изучении атмосферы. Подробный обзор имеющихся на данный момент источников THz-излучения и их применения сделан в недавней работе [1].

Среди полупроводниковых источников THz-излучения наибольший интерес вызывают квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Основной проблемой ККЛ, излучающих в THz-области, являются низкие температуры работы. И хотя в последние годы появляются новые способы приблизить рабочие температуры таких лазеров к комнатной, удалось добиться повышения только до 260 К [2]. Другим вызовом являются трудности при генерации, управлении и детектировании THz-излучения ККЛ, связанные с малой энергией фотона [3].

Иной подход к получению THz-излучения, впервые предложенный авторами [4], состоит в использовании генерации разностной частоты в схеме, основанной на двухчастотном ККЛ среднего ИК-диапазона. Сегодня такие устройства наряду с диодами Ганна являются единственными полностью полупроводниковыми источниками THz-излучения с электрической накачкой при комнатной температуре [5]. Основную трудность при этом представляет необходимость согласования фаз, которая сейчас осуществляется в геометрии Черенкова [5], что одновременно приводит к низкой эффективности генерации разностной частоты и затрудняет вывод излучения из-за его распространения под углом

к оси лазерного волновода, превышающим угол полного внутреннего отражения.

В настоящей работе предлагается схема простого в исполнении полностью полупроводникового источника THz-излучения, основанного на новом подходе к согласованию фаз при генерации разностной частоты в двухчастотном ККЛ среднего ИК-диапазона. На рис. 1 изображено поперечное сечение лазерной структуры.

Активная область исследуемой структуры ККЛ [6] позволяет осуществлять одновременную генерацию лазерного излучения на длинах волн 7.46 и 8.15  $\mu\text{m}$ . Разностная частота этих волн оказывается равной 3.4 THz. Данная схема не подразумевает в отличие от схемы синхронизации фаз Черенкова вывод разностной гармоники под углом к направлению распространения волн накачки.

Для эффективного нелинейного преобразования света помимо высокой интенсивности волн накачки необходимо выполнение двух фундаментальных условий: высокие значения нелинейной восприимчивости используемых материалов и синхронизм фаз. Структура волновода ККЛ основана на использовании слоев InP и  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . Такие структуры обладают квадратичной восприимчивостью, на несколько порядков превышающей восприимчивость однородных материалов [4], поэтому задача сводится к повышению длины когерентности волн накачки и разностной частоты, снижение которой приводит к драматическому понижению эффективности преобразования. Условие фазового синхронизма для волн в вакууме может быть записано следующим образом [7]:

$$k_1 - k_2 = k_3, \quad (1)$$

где  $k_i = 2\pi/\lambda_i$ ,  $\lambda_1 = 7.46 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 8.15 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 88.2 \mu\text{m}$ .

При распространении волн в среде ситуация осложняется материальной дисперсией показателя преломления  $n$ , т.е. его зависимостью от длины волны  $\lambda$ . В этом

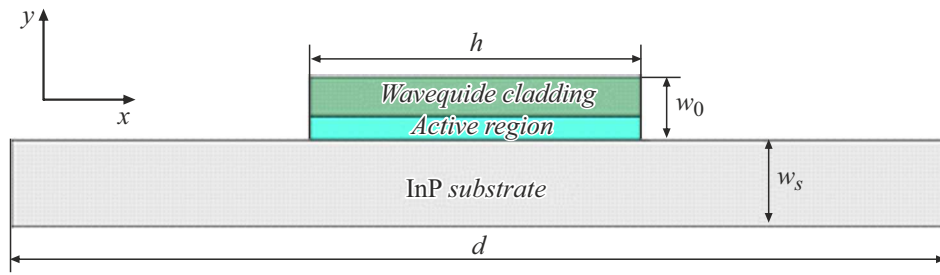


Рис. 1. Структура источника ТГц-излучения.

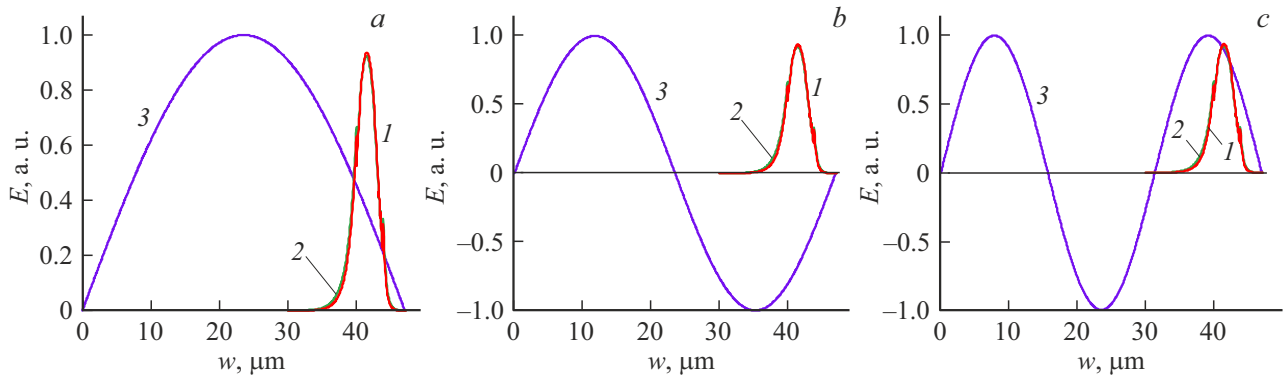


Рис. 2. Распределение амплитуд поля фундаментальных мод нулевого порядка ( $\lambda_1 = 7.46 \mu\text{m}$  — красная линия 1,  $\lambda_2 = 8.15 \mu\text{m}$  — зеленая линия 2) и разностной гармоники ( $\lambda_3 = 88.2 \mu\text{m}$  — синяя линия 3) при значениях  $m = 1$  (a), 2 (b) и 3 (c).

случае

$$k(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda}n(\lambda).$$

В этой ситуации выполнение условия (1) требует дополнительных усилий. В рассматриваемой схеме предлагается осуществлять фазовый синхронизм за счет волноводной дисперсии, с учетом которой (1) приобретает вид

$$\beta_1 - \beta_2 = \beta_3. \quad (2)$$

Здесь  $\beta_i$  — постоянная распространения  $i$ -й волны, довольно легко вычисляемая с помощью решения волнового уравнения.

Активная область ККЛ расположена на полуизолирующей подложке на основе InP, имеющей толщину  $w_s$ , значительно превышающую толщину лазерной структуры  $w_0$ . На верхнюю обкладку, как и с нижней стороны подложки, напылены металлические контакты. Основная особенность предлагаемой структуры заключается в том, что в качестве волновода для разностной частоты используется подложка. При этом фундаментальные ИК-моды распространяются по волноводу ККЛ с толщиной  $w_0$ , не утекая в подложку, в то время как разностная гармоника, обладающая на порядок большей длиной волны, распространяется по подложке как по волноводу. Можно считать, что толщина подложки оказывает существенное влияние на характер распространения разностной гармоники и никак не затрагивает фундаментальные волны, распространяющиеся по области  $w_0$ .

Ширина подложки  $d$  существенно превышает как ширину ККЛ  $h$ , так и его толщину  $w$ . Таким образом, в направлении  $x$  для разностной гармоники имеет место простой трехслойный планарный волновод с шириной порядка  $400 \mu\text{m}$ , постоянная распространения волны в котором легко вычисляется, причем волноводная дисперсия при таких значениях ширины практически подавлена. Для всей структуры она совпадает с  $x$ -компонентой волнового вектора, которую можно обозначить как  $\kappa_{3x}$ .

Профиль моды разностной частоты в направлении  $y$  имеет вид

$$E(y) = E_0 \sin \frac{\pi m y}{w}, \quad (3)$$

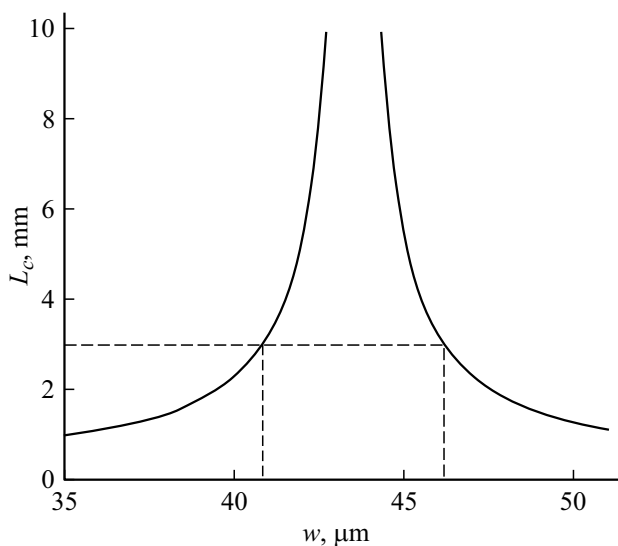
где  $w$  — толщина волновода, которая складывается из толщины подложки  $w_s$  и суммарной толщины  $w_0$  гетероструктуры ККЛ,  $m$  — целое число. Из (2) и (3) следует условие на толщину подложки, при которой обеспечивается полное согласование фаз:

$$\frac{\pi m}{w} = \sqrt{(k_3 n_s)^2 - \kappa_{3x}^2 - \beta_3^2}, \quad (4)$$

где  $n_s$  — показатель преломления подложки и эпитаксиального слоя для разностной гармоники.

Важно учитывать, что для эффективного преобразования волны накачки и разностной частоты должны перекрываться. Рис. 2 показывает распределение амплитуд фундаментальных мод и моды разностной частоты.

Наибольшее перекрытие волн накачки и разностной частоты наблюдается при  $m = 1$ . Соответствующая толщина волновода, вычисляемая согласно (4), оказывается



**Рис. 3.** Зависимость длины когерентности от толщины InP-подложки.

равной  $43.17 \mu\text{m}$ . При технологической имплементации рассматриваемой схемы необходимая толщина подложки достигается ее шлифованием и/или химическим травлением. При этом трудно точно обеспечить рассчитанные значения, поэтому важно проанализировать чувствительность структуры к изменению толщины подложки, которая определяется [7,8] длиной когерентности  $L_c = \pi/|\beta_1 - \beta_2 - \beta_3|$ . При идеальном согласовании фаз, т.е. при совпадении толщины подложки с рассчитанным значением  $43.17 \mu\text{m}$ , длина когерентности без учета поглощения обращается в бесконечность и уменьшается при отклонении от целевого значения.

Зависимость длины когерентности от толщины подложки представлена на рис. 3. Из этого рисунка следует, что предложенная схема слабо чувствительна к изменению толщины подложки: при отклонении толщины от расчетного значения в пределах  $\pm 3 \mu\text{m}$  длина когерентности не падает ниже  $3 \text{ mm}$ , что соответствует типичной длине лазерного кристалла.

Таким образом, использование подложки структуры ККЛ в качестве волновода для разностной частоты позволяет обеспечить приемлемый уровень фазового синхронизма и эффективную генерацию разностной частоты в THz-диапазоне.

## Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 21-72-30020.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S. Singh, S.K. Meena, A. Tyagi, S. Kumar, M.R. Meena, S.K. Saini, S.K. Meena, in *Intelligent electronics and circuits — terahertz, ITS, and beyond*, ed. by M. Niu (IntechOpen, 2022), p. 1–22. DOI: 10.5772/intechopen.101685
- [2] B. Wen, D. Ban, *Prog. Quantum Electron.*, **80**, 100363 (2021). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2021.100363
- [3] M.S. Vitiello, P. De Natale, *Adv. Quantum Technol.*, **5**, 2100082 (2022). DOI: 10.1002/qute.202100082
- [4] M.A. Belkin, F. Capasso, A. Belyanin, D.L. Sivco, A.Y. Cho, D.C. Oakley, C.J. Vineis, G.W. Turner, *Nat. Photon.*, **1**, 288 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.70
- [5] K. Fujita, S. Jung, Y. Jiang, J.H. Kim, A. Nakanishi, A. Ito, M. Hitaka, T. Edamura, M.A. Belkin, *Nanophotonics*, **7**, 1795 (2018). DOI: 10.1515/nanoph-2018-0093
- [6] В.В. Дюделев, С.Н. Лосев, В.Ю. Мылников, А.В. Бабичев, Е.А. Когновицкая, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Ю. Егоров, В.И. Кучинский, Г.С. Соколовский, *Оптика и спектроскопия*, **125** (3), 387 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.09.46556.147-18 [V.V. Dudelev, S.N. Losev, V.Yu. Mylnikov, A.V. Babichev, E.A. Kognovitskaya, S.O. Slipchenko, A.V. Lutetskii, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinskii, I.I. Novikov, A.Yu. Egorov, V.I. Kuchinskii, G.S. Sokolovskii, *Opt. Spectrosc.*, **125**, 402 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18090096].
- [7] G.M. Savchenko, G.S. Sokolovskii, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012069 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012069
- [8] G.M. Savchenko, G.S. Sokolovskii, in *Proc. of the 2020 Int. Conf. Laser Optics (ICLO)* (IEEE, 2020), p. 1. DOI: 10.1109/iclo48556.2020.9285719