

Генерация квантово-каскадных лазеров на длине волны излучения 5.8 мкм при комнатной температуре

© А.В. Бабичев^{+,*}, А. Bousseksou[△], Н.А. Пихтин[□], И.С. Тарасов[□], Е.В. Никитина[‡],
А.Н. Софронов[▽], Д.А. Фирсов[▽], Л.Е. Воробьев[▽], И.И. Новиков^{+□},
Л.Я. Карачинский^{+□}, А.Ю. Егоров^{+,*}

⁺ ООО „Коннектор Оптикс“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия

[△] Institut d'Electronique Fondamentale, UMR 8622 CNRS, University Paris Saclay,
91405 France

[□] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[▽] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: anton.egorov@connector-optics.com

(Получена 13 апреля 2016 г. Принята к печати 18 апреля 2016 г.)

В ходе работы продемонстрирована генерация многопериодных квантово-каскадных лазеров на длине волны излучения 5.8 мкм в импульсном режиме при комнатной температуре. Гетероструктура квантово-каскадного лазера на основе гетеропары твердых растворов InGaAs/InAlAs была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии и включала 60 идентичных каскадов. Плотность порогового тока для полоскового лазера длиной 1.4 мм и шириной 22 мкм составляла ~ 4.8 кА/см² при температуре 303 К. Максимальная зарегистрированная детектором мощность оптического излучения, выходящего с одного торца ККЛ составляет 88 мВт. Реальная оптическая мощность, выходящая с одного торца ККЛ, не менее чем 150 мВт. В статье обсуждаются полученные результаты и возможные пути оптимизации конструкции созданных квантово-каскадных лазеров.

1. Введение

С момента публикации теоретических работ о возможности усиления света при межподзонных переходах электронов [1] и экспериментальной демонстрации возможности выращивания периодических структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии [2] потребовалось более 20 лет для реализации первого квантово-каскадного лазера (ККЛ) [3].

К настоящему моменту в ККЛ на основе гетеропары InGaAs/InAlAs продемонстрирована лазерная генерация в диапазоне длин волн от 3.4 [4] вплоть до 85 мкм [5]. Демонстрация работы ККЛ на основе гетеропары InGaAs/InAlAs в непрерывном режиме [6] с мощностью оптического излучения, превосходящей сотни милливольт, подтверждает перспективность практического использования таких ККЛ для ряда применений: газоанализ, беспроводная передача информации, дистанционное детектирование взрывчатых веществ, сенсорика, клиническая медицина и др.

Один из подходов по увеличению квантовой эффективности квантово-каскадных лазеров основан на создании гетероструктур с увеличенным числом каскадов [7–14]. В идеальном случае квантовая эффективность и оптическая мощность ККЛ должны быть прямо пропорцио-

нальны числу каскадов ККЛ. Данные утверждения верны только в случае полной идентичности всех каскадов ККЛ. Речь идет о полной идентичности толщины и элементного состава всех слоев, входящих в каждый каскад, от первого до последнего. Поскольку время эпитаксиального процесса, необходимое для создания гетероструктуры ККЛ методом молекулярно-пучковой эпитаксии, достаточно велико, существует реальная вероятность постепенного изменения условий эпитаксиального процесса и нарушения идентичности слоев, входящих в последовательно выращиваемые каскады. На практике для устранения этого эффекта обычно производится плавная корректировка скорости эпитаксиального выращивания во время создания гетероструктур многопериодных ККЛ [8,15].

Несмотря на тот факт, что лазеры с длиной волны генерации вблизи 5.8 мкм еще не попадают в окно прозрачности атмосферы [16], интерес к данной спектральной области обусловлен рядом применений, в том числе в медицине. ККЛ с длиной волны генерации 5.75 мкм могут быть использованы при проведении лазерной ангиопластики для избирательного удаления атеросклеротических бляшек в аорте [17,18]. Результаты исследования свойств ККЛ с длиной волны вблизи 6 мкм приведены в [17–26].

В настоящей работе представлены результаты по формированию и исследованию оптических характеристик многопериодных квантово-каскадных лазеров, излучающих на длине волны 5.8 мкм в импульсном режиме при комнатной температуре.

2. Эксперимент

Гетероструктура ККЛ была выращена на низколегированной подложке фосфида индия InP (концентрация носителей заряда составляла $n \sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) с кристаллографической ориентацией (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке MBE49 Riber. Условия эпитаксии, последовательность, толщины и состав слоев выращенного ККЛ представлены в работе [15]. Перед формированием каскадов ККЛ решеточно-согласованный с подложкой слой InGaAs, легированный кремнием толщиной 100 нм, выращивался на подложке InP. Активная область лазерной гетероструктуры состояла из 60 каскадов, содержащих слои тройных твердых растворов $\text{In}_{0.44}\text{Al}_{0.56}\text{As}$ и $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$. Конструкция гетероструктуры с упруго компенсированной гетеропарой $\text{In}_{0.44}\text{Al}_{0.56}\text{As}/\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$ позволила увеличить разрыв зоны проводимости на гетерогранице, ΔE_c , вплоть до 630 мэВ с целью уменьшения негативного влияния теплового выброса носителей заряда при работе ККЛ. После формирования активной области последовательно выращивались InAlAs слой обкладки волновода и контактный слой InGaAs, легированный кремнием с толщинами 1500 и 50 нм соответственно. По результатам рентгеноструктурного анализа было установлено, что флуктуации состава и толщины слоев в последовательно выращенных каскадах гетероструктуры не превышают 1%.

Формирование полоска лазера начиналось с вытравливания глубокой мезы жидкостным травлением (на основе раствора $\text{HBr} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$). В качестве маски для травления использовался слой оксида кремния, локально вытравленный в фтор-содержащей плазме под маской фоторезиста AZ 5214. После формирования профиля мезы и удаления маски на основе оксида кремния производилась пассивация боковых стенок мезы путем напыления слоя нитрида кремния, Si_3N_4 , методом плазмохимического осаждения. Открытие окон в слое Si_3N_4 под металлизацию проводилось путем реактивного ионного травления в смеси газов CHF_3/O_2 под маской из фоторезиста. Верхняя металлизация формировалась за счет высоковакуумного термического напыления последовательных слоев титана и золота с толщинами 20 и 200 нм соответственно. Перед напылением нижнего металлического контакта пластина утонялась до толщины 150 мкм. В качестве нижней металлизации использовалась последовательность слоев титан/золото с толщинами 20 и 200 нм соответственно. В итоге ширина созданных полосковых лазеров составляла 22 мкм. Типичный вид скола сформированного лазера представлен на рис. 1. Полоски формировались скалыванием. Длина

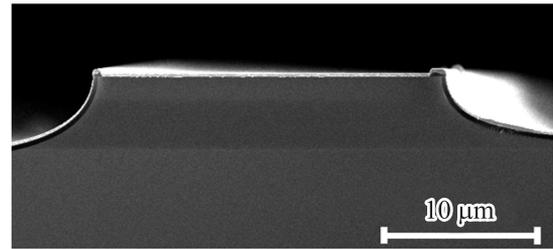


Рис. 1. Изображение торца изготовленного ККЛ, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

полосковых лазеров составляла 1.4 мм. Отражающее и антиотражающее покрытия на сколотые грани лазера не наносились. Монтаж производился на посеребренный медный теплоотвод „гетероструктурой вверх“.

Исследования смонтированных на теплоотвод экспериментальных образцов ККЛ проводились при температуре 303 К. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись при пропускании импульсов тока с длительностью 50 нс на частоте 84 кГц (скважность импульсов составляла 0.45%). Спектры стимулированного излучения ККЛ регистрировались с помощью фурье-спектрометра и фотоприемника на основе HgCdTe. Измерение абсолютной мощности выводимого излучения ККЛ проводилось с помощью откалиброванного детектора. Расстояние между ККЛ и детектором составляло порядка 10 см. Потери при сборе выводимого излучения ККЛ составляли 45%. Таким образом, измеряемый сигнал составлял 55% от исходного.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты численного расчета распределения интенсивности основной ТМ моды в созданной гетероструктуре ККЛ представлены на рис. 2. Фактор оптического

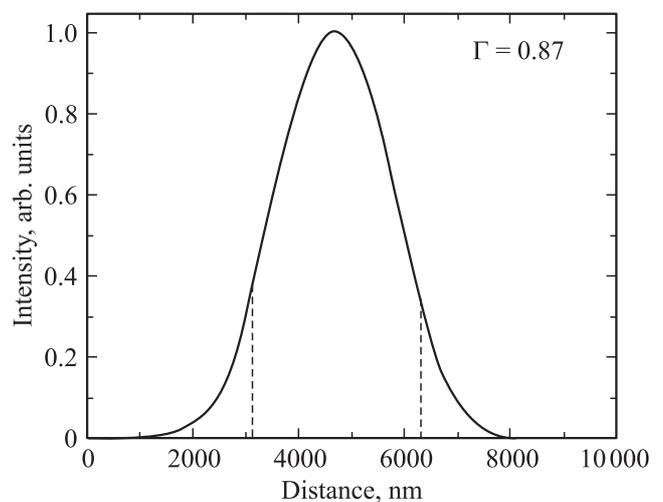


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения основной ТМ моды в гетероструктуре ККЛ. Пунктиром отмечены границы активной области гетероструктуры ККЛ.

ограничения основной ТМ моды в сформированном волноводе $\Gamma = 0.87$. Эффективность усиления оптического излучения в созданной гетероструктуре невысока в силу того, что периферийные области волновода и периферийные каскады слабо взаимодействуют со световой волной. В результате использование большого числа каскадов (60) не приводит к желаемому увеличению значений квантовой эффективности и оптической мощности, а лишь приводит к увеличению электрического напряжения и дополнительному разогреву лазера. Периферийные каскады фактически не работают. Для достижения более высоких значений оптической мощности и более низких плотностей порогового тока необходима дальнейшая оптимизация конструкции волновода гетероструктуры ККЛ.

При расчете распределения интенсивности основной ТМ моды в созданной гетероструктуре использовались значения показателей преломления слоев, приведенные в таблице. Показатель преломления активной области (60 квантовых каскадов) определялся с помощью формулы $n_{AR} = xn_{well} + (1-x)n_{barrier}$, где n_{AR} , n_{well} , $n_{barrier}$ — показатели преломления активной области, ямы и барьера соответственно, x — отношение суммарной толщины слоев InGaAs к общей толщине каскада ККЛ. Показатели преломления тройных твердых растворов n_{well} , $n_{barrier}$ рассчитывались с использованием величин показателей преломления бинарных соединений AlAs, InAs, GaAs, приведенных в публикациях [27,28], с соответствующими весовыми коэффициентами.

Измеренные ВАХ для двух исследованных образцов ККЛ представлены на рис. 3. Идентичность двух измеренных характеристик свидетельствует о высокой однородности параметров гетероструктуры по поверхности полупроводниковой пластины.

Рис. 4 демонстрирует спектры генерации двух исследованных образцов ККЛ. В обоих случаях наблюдается многомодовая лазерная генерация вблизи длины волны 5.8 мкм. Межмодовое расстояние между продольными модами $\Delta\lambda$ составляет ~ 0.0037 мкм. Эффективный показатель преломления для основной моды $n_{eff} = \lambda^2 / (2L\Delta\lambda) = 3.26$, где L — длина резонатора, составляет 9.1 см^{-1} . Расчетное значение коэффициента отражения зеркал, $R_{eff} = (n_{eff} - 1)^2 / (n_{eff} + 1)^2$ составляет 0.28. Коэффициент потерь на зеркалах $\alpha_m = \ln(R_{eff}) / L$.

Данные по значениям показателя преломления слоев ККЛ

Материал слоя	Толщина слоя, нм	Действительная часть показателя преломления, n	Мнимая часть показателя преломления, k
InP [29]	3000	3.08	0
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ($n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	100	3.39	0
Активная область на основе гетеропары $\text{In}_{0.44}\text{Al}_{0.56}\text{As}/\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$	$53.4 \cdot 60 = 3204$	3.26	0
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	1500	3.15	0
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ($n = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	50	2.60	$4.33 \cdot 10^{-5}$
Воздух	5000	1	0

Примечание. Показатели преломления слоев InGaAs рассчитывались с учетом уровня легирования.

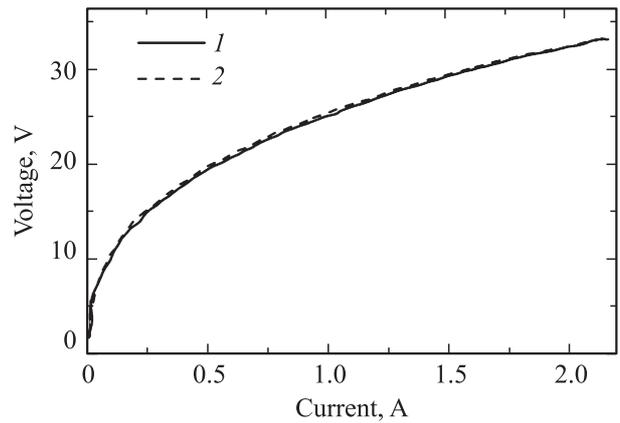


Рис. 3. ВАХ двух ККЛ, измеренные при $T = 303 \text{ К}$.

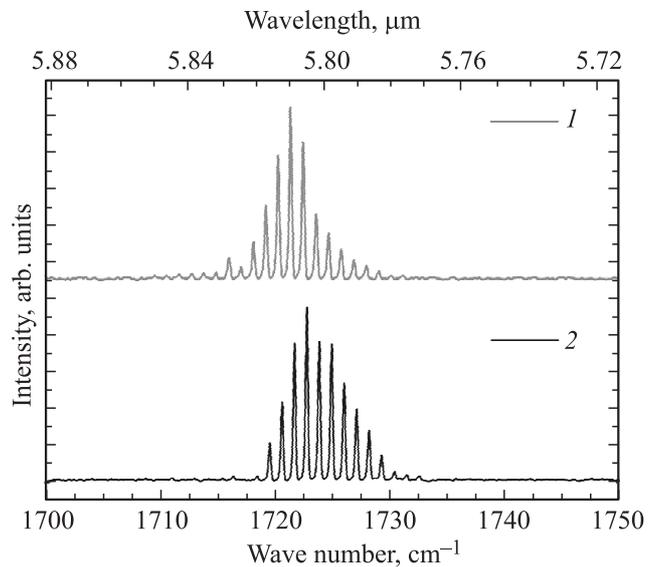


Рис. 4. Спектры стимулированного излучения двух образцов ККЛ, измеренные при 303 К. Длина полоска ККЛ 1.4 мм.

Ватт-амперная характеристика образца представлена на рис. 5. Измерение оптической мощности производилось при помощи откалиброванного детектора. Максимальная зарегистрированная величина оптической

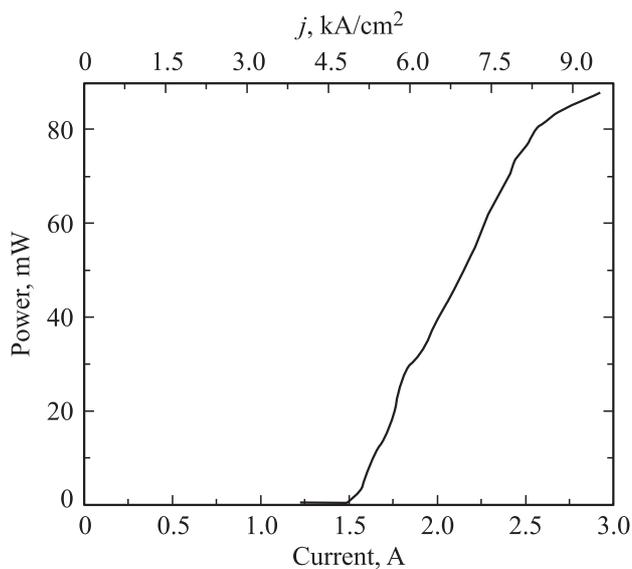


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика образца ККЛ, измеренная при температуре 303 К.

мощности, генерируемой ККЛ, выходящей с одного торца лазера, при работе лазера в импульсном режиме составляет 88 мВт. Как упоминалось ранее, оценочная величина потерь оптической системы при сборе излучения, выходящего из ККЛ, 45% и только 55% выходящего излучения попадает на фотоприемную площадку детектора. В результате реальная оптическая мощность, выходящая с одного торца ККЛ, не менее чем 150 мВт. Плотность порогового тока составляет 4.8 кА/см^2 и соответствует пороговому напряжению $U_{th} \sim 29.6 \text{ В}$. Дифференциальная эффективность с учетом того что лазер излучает одинаковую мощность с обоих сколов, составляет 0.16 Вт/А . Путем нанесения отражающих и антиотражающих покрытий на торцы лазера мощность излучения, выходящего с одного торца лазера, может быть увеличена до 280–320 мВт [30].

4. Заключение

В ходе работы продемонстрирована генерация плосковых лазеров, изготовленных из многопериодной упруго скомпенсированной гетероструктуры ККЛ, состоящей из 60 каскадов на основе гетеропары $\text{In}_{0.44}\text{Al}_{0.56}\text{As}/\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$. Генерация наблюдается на длине волны 5.8 мкм при температуре 303 К в импульсном режиме. Плотность порогового тока плосковых лазеров длиной 1.4 мм составляет $I_{th} \sim 4.8 \text{ кА/см}^2$. Максимальная зарегистрированная детектором мощность оптического излучения, выходящего с одного торца ККЛ, составляет 88 мВт. Реальная оптическая мощность, выходящая с одного торца ККЛ, не менее чем 150 мВт. Дифференциальная эффективность равна 0.16 Вт/А . Путем нанесения отражающих и антиотражающих покрытий на торцы лазера мощность излучения, выходящего с одного торца лазера, может быть увеличена до

280–320 мВт. Для достижения более высоких значений оптической мощности и более низких плотностей порогового тока необходима дальнейшая оптимизация конструкции гетероструктуры ККЛ [31].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-29-03289 офи_м, 16-29-09580 офи_м.

Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Суриц. ФТП, **5**, 797 (1971).
- [2] A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **19**, 467 (1971).
- [3] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. Science, **264** (5158), 553 (1994).
- [4] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, S.N.G. Chu, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **72**, 680 (1998).
- [5] M. Fischer, G. Scalari, C. Walther, J. Faist. J. Cryst. Growth, **311** (7), 1939 (2009).
- [6] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, H. Melchior. Science, **295** (5553), 301 (2002).
- [7] C. Gmachl, F. Capasso, A. Tredicucci, D.L. Sivco, R. Kohler, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **5** (3), 808 (1999).
- [8] O. Fedosenko, M. Chashnikova, S. Machulik, J. Kischkat, M. Klinkmüller, A. Aleksandrova, G. Monastyrskiy, M.P. Semtsiv, W.T. Masselink. J. Cryst. Growth, **323** (1), 484 (2011).
- [9] A. Lyakh, C. Pflüg, L. Diehl, Q.J. Wang, F. Capasso, X.J. Wang, J.Y. Fan, T. Tanbun-Ek, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, C.K.N. Patel. Appl. Phys. Lett., **92** (11), 111110 (2008).
- [10] X. Chen, L. Cheng, D. Guo, F.S. Choa, T. Worchesky. Proc. SPIE OPTO. (San Francisco, USA, 2011) **7953**, p. 79531Z (2011).
- [11] C.A. Wang, A.K. Goyal, R.K. Huang, J.P. Donnelly, D.R. Calawa, G.W. Turner, A. Sanchez-Rubio, A. Hsu, Q. Hu, B. Williams. MA 02420-9108. http://www.rle.mit.edu/thz/documents/Wang_QCLmaterials_09_v3.pdf
- [12] F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, A. Tredicucci, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho, H.C. Liu. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **6**(6), 931 (2000).
- [13] M. Razeghi. Proc. SPIE OPTO. (San Jose, USA), **7230**, 723011 (2009).
- [14] Y. Bai, S. Slivken, S. Kuboya, S.R. Darvish, M. Razeghi. Nat. Photonics, **4** (2), 99 (2010).
- [15] А.Ю. Егоров, П.Н. Брунков, Е.В. Никитина, Е.В. Пирогов, М.С. Соболев, А.А. Лазаренко, М.В. Байдакова, Д.А. Кириленко, С.Г. Конников. ФТП, **48** (12), 1640 (2014).
- [16] R. Furstenberg, C.A. Kendziora, J. Stepnowski, S.V. Stepnowski, M. Rake, M.R. Papantonakis, V. Nguyen, G.K. Hubler, R.A. McGill. Appl. Phys. Lett., **93** (22), 224103 (2008).
- [17] K. Hashimura, K. Ishii, K. Awazu. Jpn. J. Appl. Phys., **54** (11), 112701 (2015).
- [18] K. Hashimura, K. Ishii, N. Akikusa, T. Edamura, H. Yoshida, K. Awazu. Adv. Biomed. Eng., **1**, 74 (2012).
- [19] J.S. Yu, A. Evans, J. David, L. Doris, S. Slivken, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **83** (25), 5136 (2003).
- [20] M. Razeghi, S. Slivken, J. Yu, A. Evans, J. David. Microelectron. J., **34** (5), 383 (2003).

- [21] S. Slivken, A. Evans, J. David, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **81** (23), 4321 (2002).
- [22] J.S. Yu, A. Evans, J. David, L. Doris, S. Slivken, M. Razeghi. IEEE Phot. Techn. Lett., **16** (3), 747 (2004).
- [23] J.S. Yu, S. Slivken, A. Evans, L. Doris, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **83** (13), 2503 (2003).
- [24] A. Evans, J.S. Yu, J. David, L. Doris, K. Mi, S. Slivken, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **84** (3), 314 (2004).
- [25] S. Slivken, J.S. Yu, A. Evans, J. David, L. Doris, M. Razeghi. IEEE Phot. Techn. Lett., **16** (3), 744 (2004).
- [26] J.S. Yu, S. Slivken, A. Evans, J. David, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **82**, 3397 (2003).
- [27] R.E. Fern, A. Onton. J. Appl. Phys., **42** (9), 3499 (1971).
- [28] E.D. Palik. *Handbook of optical constants of solids*. (San Diego, CA, Academic Press, 1998), p. 479.
- [29] A. Friedrich, G. Scarpa, G. Boehm, M.C. Amann. Electron. Lett., **40** (22), 1 (2004).
- [30] L. Diehl, D. Bour, S. Corzine, J. Zhu, G. Hofler, M. Loncar, M. Troccoli, F. Capasso. Appl. Phys. Lett., **88** (20), 201115 (2006).
- [31] Y.V. Flores, A. Aleksandrova, M. Elagin, J. Kischkat, S.S. Kurlov, G. Monastyrskyi, J. Hellemann, S.L. Golovynskyi, O.I. Dacenko, S.V. Kondratenko, G.G. Tarasov, M.P. Semtsiv, W.T. Masselink. J. Cryst. Growth, **425**, 360 (2015).

Редактор Г.А. Оганесян

Room temperature operation of Quantum Cascade Laser at 5.8 μm wavelength

A.V. Babichev^{+,*}, A. Bousseksou[△], N.A. Pikhin[□],
I.S. Tarasov[□], E.V. Nikitina[‡], A.N. Sofronov[▽],
D.A. Firsov[▽], L.E. Vorobjev[▽], I.I. Novikov^{+□},
L.Ya. Karachinsky^{+□}, A.Yu. Egorov^{+*}

⁺ Connector Optics LLC,
194292 St. Petersburg, Russia

^{*} ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

[△] Institut d'Electronique Fondamentale, UMR 8622
CNRS, University Paris Saclay,
91405 France

[□] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

[‡] St. Petersburg Academic University,
194021 St. Petersburg, Russia

[▽] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract We report about the laser operation of quantum-cascade lasers at 5.8 micrometer at room temperature (in pulse injection mode). The quantum-cascade laser is grown by molecular-beam epitaxy technique and consist of 60 active stages of InGaAs/AlInAs hetero-structure and Phosphorus free top cladding of AlGaAs. The threshold current density at room temperature is about $I_{\text{th}} \sim 4.8 \text{ kA/cm}^2$. The total measured output peak power from one single facet is about 88 mW (without backfacet coating). Further optimization is based on InP cladding, the epi-down mounting approach, vertical side-wall forming by dry etching along with buried regrowth with semi-insulating InP : Fe doped.