

Южно-Уральский государственный университет
Кафедра оптоинформатики

ФИЛИМОНОВА Ольга Александровна

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОНОВ И
ФОТОНОВ В КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРАХ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. А.Е. Коренченко

Челябинск 2018

Оглавление

Введение	2
1 Исследование времени жизни электронов и фотонов в квантово-каскадных лазерах. Обзор литературы	3
1.1 Квантово-каскадные лазеры	4
1.2 Эволюционные алгоритмы	6
2 Система кинетических уравнений трехуровневого квантово-каскадного лазера	8
2.1 Решение системы кинетических уравнений трехуровневого квантово-каскадного лазера	9
3 Эволюционные алгоритмы	11
3.1 Основные положения теории эволюционных вычислений	12
3.2 Преимущества эволюционных вычислений	15
3.3 Формализованная модель эволюционных стратегий	17
4 Вычисление времени жизни электронов и фотонов	19
4.1 Решение уравнения с целочисленными корнями	20
4.2 Принцип работы программы	22
4.3 Вычисленные времена жизни электронов и фотонов	24
Литература	27

Введение

За последнее десятилетие, благодаря своей широкополосной перестраиваемости и высокой производительности, квантово-каскадные лазеры стали наиболее часто использоваться в качестве источников инфракрасного излучения [1].

Квантово-каскадные лазеры - это полупроводниковые лазеры, излучающие в том диапазоне инфракрасной области, в которой поглощает свет некоторые молекулы. Эта особенность квантово-каскадных лазеров позволяет создавать приборы, способные обнаруживать вещество, которое занимает ничтожно мизерную часть объема. Так в 2017 году учеными Принстонского университета был представлен датчик, точность измерения которого 0,15 миллиардных долей на единицу объема для N_2O , который является побочным продуктом в химической промышленности, и 0,36 миллиардных долей на единицу объема для CO , что существенно для раннего обнаружения возгораний [2].

Кроме того, квантовые-каскадные лазеры являются перспективными источниками когерентного терагерцового излучения. К сожалению, практически все из них работают при низких температурах. Для решения этой проблемы основное внимание уделяется проектам, повышающим время жизни носителей зарядов на верхнем уровне [3].

Таким образом, изучение времени жизни электронов и фотонов в квантово-каскадных лазерах является важным аспектом для их улучшения.

Целью данной работы является численный анализ времени жизни электронов и фотонов в квантово-каскадных лазерах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

- 1 Численно получить решение существующих систем кинетических уравнений для описания работы квантово-каскадных лазеров.
- 2 С помощью эволюционного алгоритма получить численные значения времени жизни электронов и фотонов.
- 3 Сравнить полученные вычисленные значения с экспериментальными значениями времени жизни электронов и фотонов.

Заключение

В работе построен алгоритм вычисления времени жизни электронов и фотонов в квантово-каскадных лазерах. В ходе его проверки на тестовом варианте получены результаты.

- 1 Вычисленное время жизни фотонов составило 3.32 пикосекунды при табличном значении в 3.36 пикосекунды. Вычисленное время пролета электронов через квантовые ямы посредством туннельного эффекта составило 1.025 пикосекунды при табличном значении в 1 пикосекунду. Таким образом, программа аппроксимирует коэффициенты системы дифференциальных уравнений с погрешностью менее 2%.
- 2 Отмечены переходные интервалы на начальном этапе после включения лазера, которые обусловлены нагреванием среды.
- 3 Программа может быть использована для вычисления неизвестных коэффициентов других систем дифференциальных уравнений. В том числе, она может быть применена для вычисления времени жизни электронов и фотонов для квантово-каскадных лазеров с любым количеством энергетических уровней.

Литература

- [1] Belkin Mikhail A, Capasso Federico. New frontiers in quantum cascade lasers: high performance room temperature terahertz sources // *Physica Scripta*. — 2015. — nov. — Vol. 90, no. 11. — P. 118002.
- [2] Cs-ldtc Case Study. Utilizing Quantum Cascade Lasers for Gas Sensing in the // *Wavelength Electronics*. — 2017. — no. 406. — P. 1–3.
- [3] Williams Benjamin S. Terahertz quantum-cascade lasers // *Nature Photonics*. — 2007. — Vol. 1, no. 9. — P. 517–525. — 0402594v3.
- [4] Казаринов Р.Ф., Сурис Р. А. No Title // *Физика и техника полупроводников*. — 1971. — Vol. 5, no. 4. — P. 797–800.
- [5] Sensitivity of heterointerfaces on emission wavelength of quantum cascade lasers / C.A. Wang, B. Schwarz, D.F. Siriani et al. // *Journal of Crystal Growth*. — 2017. — apr. — Vol. 464. — P. 215–220.
- [6] Pearsall Thomas P. *Quantum Photonics. Graduate Texts in Physics*. — Cham : Springer International Publishing, 2017. — ISBN: 978-3-319-55142-5.
- [7] Perlin E. Yu., Vartanjan T. A., Fedorov A. V. *Физика твердого тела*. — 2008.
- [8] High-speed operation of gain-switched midinfrared quantum cascade lasers / Roberto Paiella, Federico Capasso, Claire Gmachl et al. // *Applied Physics Letters*. — 1999. — Vol. 75, no. 17. — P. 2536–2538.
- [9] Quantum cascade lasers: ultrahigh-speed operation, optical wireless communication, narrow linewidth, and far-infrared emission / Federico Capasso, Roberto Paiella, Rainer Martini et al. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 2002. — jun. — Vol. 38, no. 6. — P. 511–532.
- [10] Компьютерное моделирование наноструктур / Д А Усанов, Ал В Скрипаль, Ан В Скрипаль, А В Абрамов. — Саратов, 2013. — ISBN: 5292026530.
- [11] Saha Sumit, Kumar Jitendra. Analysis of the effects of temperature and the electric field on quantum cascade laser characteristics // *Optical and Quantum Electronics*. — 2015. — oct. — Vol. 47, no. 10. — P. 3273–3287.

- [12] Simulation of the interplay between stimulated emission and carrier distribution in quantum-cascade lasers / L. Schrottke, M Giehler, M Wienold et al. // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. — 2010. — sep. — Vol. 42, no. 10. — P. 2632–2635.
- [13] Hamadou A, Thobel J, Lamari S. Rate equations model and optical external efficiency of optically pumped electrically driven terahertz quantum cascade lasers // *Optical Materials*. — 2016. — Vol. 60. — P. 305–312.
- [14] Hamadou Abdelouahab. The effect of external cavity reflectivity on the dynamic behaviors of quantum cascade laser // *Chinese Journal of Physics*. — 2018.
- [15] Distributed architecture for developing mixed-criticality systems in multi-core platforms / Héctor Pérez, J. Javier Gutiérrez, Salva Peiró, Alfons Crespo // *Journal of Systems and Software*. — 2017. — jan. — Vol. 123. — P. 145–159.
- [16] Yousefvand Hossein Reza. Self-consistent electro-opto-thermal model of quantum cascade lasers with coupled electron and phonon interactions far from equilibrium // *Optics Communications*. — 2017. — dec. — Vol. 405. — P. 80–87.
- [17] Hamadou a., Thobel J.-L. Modelling of optical Kerr effects on the static and dynamic behaviors of quantum cascade laser // *Optics Communications*. — 2011. — Vol. 284, no. 12. — P. 2972–2979.
- [18] Hamadou A. Analytical investigation of the dynamics behaviors of quantum cascade laser // *Optics Communications*. — 2015. — jan. — Vol. 335. — P. 271–278.
- [19] Yousefvand Hossein Reza. Modeling of mid-infrared quantum cascade lasers: The role of temperature and operating field strength on the laser performance // *Optics Communications*. — 2017. — jul. — Vol. 395. — P. 61–71.
- [20] Peter S, Zory. *Quantum Well Lasers*. — Academic Press, Inc., 1993.
- [21] Wartak M.S., Weetman P. Advanced Modeling of Quantum Well Semiconductor Lasers Based on Wigner Function Approach // 19th International Symposium on High Performance Computing Systems and Applications (HPCS'05). — IEEE, 2005. — P. 288–294.
- [22] Chaotic light at mid-infrared wavelength / Louise Jumpertz, Kevin Schires, Mathieu Carras et al. // *Light: Science & Applications*. — 2016. — jun. — Vol. 5, no. 6. — P. e16088.

- [23] Hot electrons and Hot phonons in Quantum Cascade Lasers Processes in QCLs / Vincenzo Spagnolo, Miriam S Vitiello, Gaetano Scamarcio, Politecnico Bari // *Physica B*. — 2006. — Vol. 314. — P. 336–340.
- [24] Marcuse Dietrich. Classical derivation of the laser rate equation // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 1983. — aug. — Vol. 19, no. 8. — P. 1228–1231.
- [25] Saha Sumit, Kumar Jitendra. Complete rate equation modelling of quantum cascade lasers for the analysis of temperature effects // *Infrared Physics & Technology*. — 2016. — nov. — Vol. 79. — P. 85–90.
- [26] Rate equation analysis of frequency chirp in optically injection-locked quantum cascade lasers / C. Wang, F. Grillot, V. I. Kovanis et al. // *Proc. of SPIE*. — 2014. — mar. — Vol. 8980. — P. 898014.
- [27] Hamadou A., Thobel J.-L., Lamari S. Rate equations analysis of a dual-wavelength quantum cascade laser // *Optics Communications*. — 2013. — sep. — Vol. 305. — P. 147–154.
- [28] Leong Tan Chee, Vaya Pukhraj. The Effect of Temperature on the Operation of Quantum Well Laser: A Simulation Study Based on Three-Level Rate Equations // *Fiber and Integrated Optics*. — 2006. — dec. — Vol. 25, no. 6. — P. 441–450.
- [29] Darman Mohsen, Fasihi Kiazand. Three-level rate-equations-based model of quantum cascade lasers with a single solution regime // *Optical and Quantum Electronics*. — 2017. — mar. — Vol. 49, no. 3. — P. 110.
- [30] Vikhar Pradnya A. Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects // 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). — IEEE, 2016. — dec. — P. 261–265.
- [31] Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Основы теории эволюционных вычислений. — Ростов-н/Д. : ЮФУ, 2010. — P. 320.
- [32] Evolutionary algorithm for reference evapotranspiration analysis / Srdjan Jovic, Blagoje Nedeljkovic, Zoran Golubovic, Nikola Kostic // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2018. — jul. — Vol. 150, no. March. — P. 1–4.
- [33] Multiobjective evolutionary algorithms based on target region preferences / Longmei Li, Yali Wang, Heike Trautmann et al. // *Swarm and Evolutionary Computation*. — 2018. — Vol. 40. — P. 196–215.

- [34] Fogel David. B. The Advantages of Evolutionary Computation // Biocomputing and emergent computation: Proceedings of BCEC97 / Ed. by Dan Lundh, Björn Olsson, Ajit Narayanan. — World Scientific Press, 1997. — P. 1–11.
- [35] Kobeaga Gorka, Merino María, Lozano Jose A. An efficient evolutionary algorithm for the orienteering problem // Computers and Operations Research. — 2018. — Vol. 90. — P. 42–59.
- [36] Hamadou A., Lamari S., Thobel J.-L. Dynamic modeling of a midinfrared quantum cascade laser // Journal of Applied Physics. — 2009. — may. — Vol. 105, no. 9. — P. 093116.
- [37] Darman Mohsen, Fasihi Kiazand. Circuit-level modeling of quantum cascade lasers: Influence of Kerr effect on static and dynamic responses // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. — 2016. — nov. — Vol. 127, no. 22. — P. 10303–10310.
- [38] Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2009. — Vol. 4 (93). — P. 16–27.
- [39] A dynamic multiobjective evolutionary algorithm based on a dynamic evolutionary environment model / Juan Zou, Qingya Li, Shengxiang Yang et al. // Swarm and Evolutionary Computation. — 2018.
- [40] InDM2: Interactive Dynamic Multi-Objective Decision Making Using Evolutionary Algorithms / Antonio J. Nebro, Ana B. Ruiz, Cristóbal Barba-González et al. // Swarm and Evolutionary Computation. — 2018. — Vol. 40. — P. 184–195.
- [41] Bilal Saoud, Abdelouahab Moussaoui. Evolutionary algorithm and modularity for detecting communities in networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2017. — Vol. 473. — P. 89–96.
- [42] Dynamic Modeling of Terahertz Quantum Cascade Lasers / Yoann Petitjean, Fabien Destic, Jean-Claude Mollier, Carlo Sirtori // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. — 2011. — Vol. 17, no. 1. — P. 22–29.