ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Модуляция интенсивности излучения узкоспектрального лазера инфракрасного диапазона при прохождении структуры квантового каскадного лазера

С.А. Чахлов,[1,2,3,*] Л.А. Миклашевич,[3] А.А. Ластовкин,[3] Н.Г. Захаров[3]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

[2] *Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Саров Россия, 607188, Саров, ул. Парковая, д. 8*

[3] *Институт лазерно-физических исследований, РФЯЦ–ВНИИЭФ Россия, 607188, Саров, пр-т Мира, д. 38*

(Поступила в редакцию 27.11.2024; после доработки 20.05.2025; подписана в печать 27.05.2025)

Получен эффект модуляции интенсивности излучения узкоспектрального лазера диапазона 1590 нм, прошедшего через волноводную структуру квантового каскадного лазера, наблюдаемый при приложении к структуре электрического поля. Данный эффект раскрывает термодинамику активной области квантового каскадного лазера, работающего в импульсном режиме, что актуально в задаче оптической связи, реализованной на принципе высокочастотной амплитудной модуляции сигнала.

PACS: 42.55.Px. УДК: 53.04
Ключевые слова: квантовый каскадный лазер, модуляция, узкоспектральный лазер, экситоны.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2540401

Квантовый каскадный лазер (ККЛ) — это однополярное устройство, основанное на оптических переходах между электронными состояниями, создаваемыми пространственным ограничением в полупроводниковых ямах, посредством квантовой инженерии электронных волновых функций в нанометровом масштабе. Важным преимуществом ККЛ для устройств оптической связи является возможность генерации излучения практически любой длины волны в среднем и дальнем ИК-диапазонах [1]. Одной из основных проблем, ограничивающих работу ККЛ в импульсном режиме на высоких частотах, является разогрев активной области [2]. Активная область ККЛ состоит из гетеослоев, например InGaAs/InAlAs, выращенных на подложке InP [3, 4]. Путем травления двух канавок в активной области образуются гребневые волноводы ККЛ, ширина которых составляет ~ 10 мкм, а длина — несколько миллиметров. Зеркала резонатора образуются сколами по кристаллографическим осям. Для улучшения охлаждения активной области ККЛ монтируется на медный теплоотвод. Изучение термодинамики ККЛ является важной задачей для создания устройств оптической связи в ИК-диапазоне.

В настоящей работе продемонстрирован эффект модуляции интенсивности излучения узкоспектрального лазера диапазона 1590 нм, прошедшего через волноводную структуру ККЛ, возникающий при изменении электрического поля. Таким образом, внешнее зондирующее излучение может быть использовано для неинвазивного исследования термодинамики активной области и транспорта носителей ККЛ. Исследования подразумевают отслеживание динамики температуры во время и после импульса питания, а также определение предельной тактовой частоты лазера.

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовалась квантовая каскадная структура лазера, изготовленная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [3, 4]. Структура состоит из гетеослоев $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$, величины запрещенных зон при температуре 300 К составляют 0.74 эВ и 1.47 эВ соответственно. Энергия фотона излучения лазера диапазона 1590 нм — 0.78 эВ. Выбор длины волны зондирующего лазера основан на следующем соображении: энергия фотона должна быть больше, но близка к величине запрещенной зоны квантовой ямы, так как при таком значении энергии наблюдается пик экситонного поглощения с резкими краями спектра [5], что повышает динамику наблюдений. Ширина спектра излучения $\Delta\nu_{\text{лазера}} = 5$ МГц выбрана исходя из условия $\Delta\nu_{\text{лазера}} \ll \Delta\nu_{\text{экситон}}$, где $\Delta\nu_{\text{экситон}} = 1$ ТГц [5].

Принципиальная схема эксперимента изображена на рис. 1.

Излучение зондирующего лазера с помощью волокна 5/125 мкм с числовой апертурой 0.12 согласовывалось с волноводной модой ККЛ. Волокно размещалось вплотную к торцу волновода квантовой

* E-mail:chahlov@yandex.ru

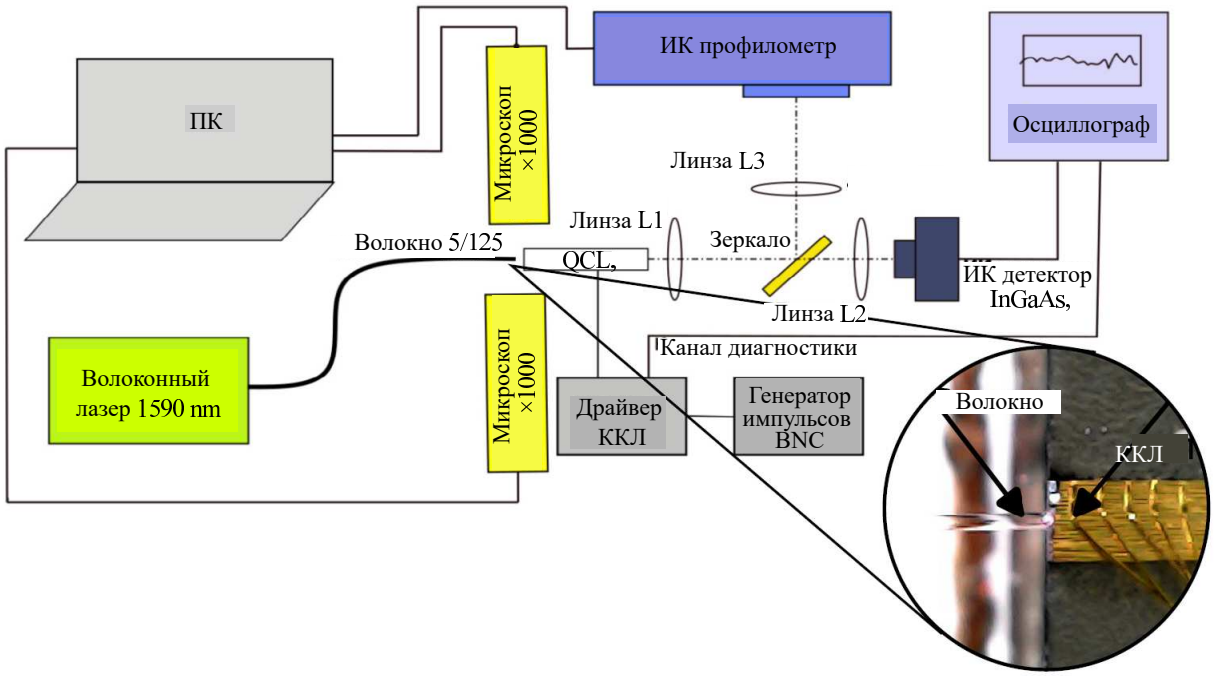

Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента. В круге с увеличением — изображение взаимного расположения волокна и ККЛ с оптического микроскопа

каскадной структуры и позиционировалось с точностью порядка микрометра по трем координатам, что контролировалось по изображению с двух взаимно-перпендикулярных ракурсов с помощью оптических микроскопов с 1000-кратным увеличением. Изображение с одного из микроскопов также представлено на рис. 1.

Излучение зондирующего лазера после прохождения через волновод структуры ККЛ коллимировалось линзой Л1 с $f = 25$ мм, а затем фокусировалось линзой Л2 с $f = 35$ мм на приемной площадке инфракрасного InGaAs детектора. Коллимированный пучок при необходимости отводился зеркалом с золотым покрытием на линзу Л3 с $f = 1000$ мм, с помощью которой фокусировался на матрице пироэлектрического профилометра. Питание ККЛ осуществлялось в импульсно-периодическом режиме с помощью драйвера, формирующего импульсы электрического напряжения заданной амплитуды до 12 В, длительности от 200 нс до 1300 нс и частоты 10 кГц, задаваемые с помощью генератора импульсов и задержек. Персональный компьютер использовался для получения изображений с микроскопов и профилометра. Осциллограф использовался для регистрации сигналов с InGaAs детектора и диагностического канала, соответствующего импульсам питания ККЛ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 сверху изображена типичная осциллограмма сигнала в режиме постоянного тока при входном импедансе осциллографа 50 Ом.

Время $t < 0$ соответствует сигналу с InGaAs детектора перед включением импульса питания. Время $t = 0$ соответствует моменту включения напряжения питания, а время $t = 0.2$ мкс — отключения напряжения питания. Видно, что при включении напряжения питания сигнал начинает падать и снижается на 25%, при выключении продолжает снижаться в течение 3 мкс до уровня 50% от начального, а после восстанавливается до исходного значения за время около 30 мкс. Таким образом, на осциллограмме зафиксирован эффект модуляции интенсивности излучения узкоспектрального лазера диапазона 1590 нм, прошедшего через волноводную структуру ККЛ, наблюдаемый при приложении к структуре электрического поля.

Осциллограммы для ряда значений приложенных к структуре электрических напряжений представлены на рис. 2 слева внизу. При увеличении амплитуды питания от 0 В до 12 В отношение максимума сигнала к минимуму возрастает, но качественно осциллограммы не меняются. Длительность передних фронтов сигналов возрастает с ростом напряжения с 1.5 мкс для 8 В до 2.4 мкс для 12 В. Задние фронты сигналов хорошо аппроксимируются экспонентой вида $y = y_0 + A \cdot e^{-(x-x_0)/t}$, характерное время терморелаксации t для всех значений напряжений равно 9 мкс.

Осциллограммы сигнала детектора, в зависимости от длительности импульса приложенного к ККЛ напряжения при неизменном значении амплитуды, равном 12 В, представлены на рис. 2 справа внизу. Отношение максимума сигнала к минимуму возрастает с увеличением длительности импульса, но качественно картина не меняется.

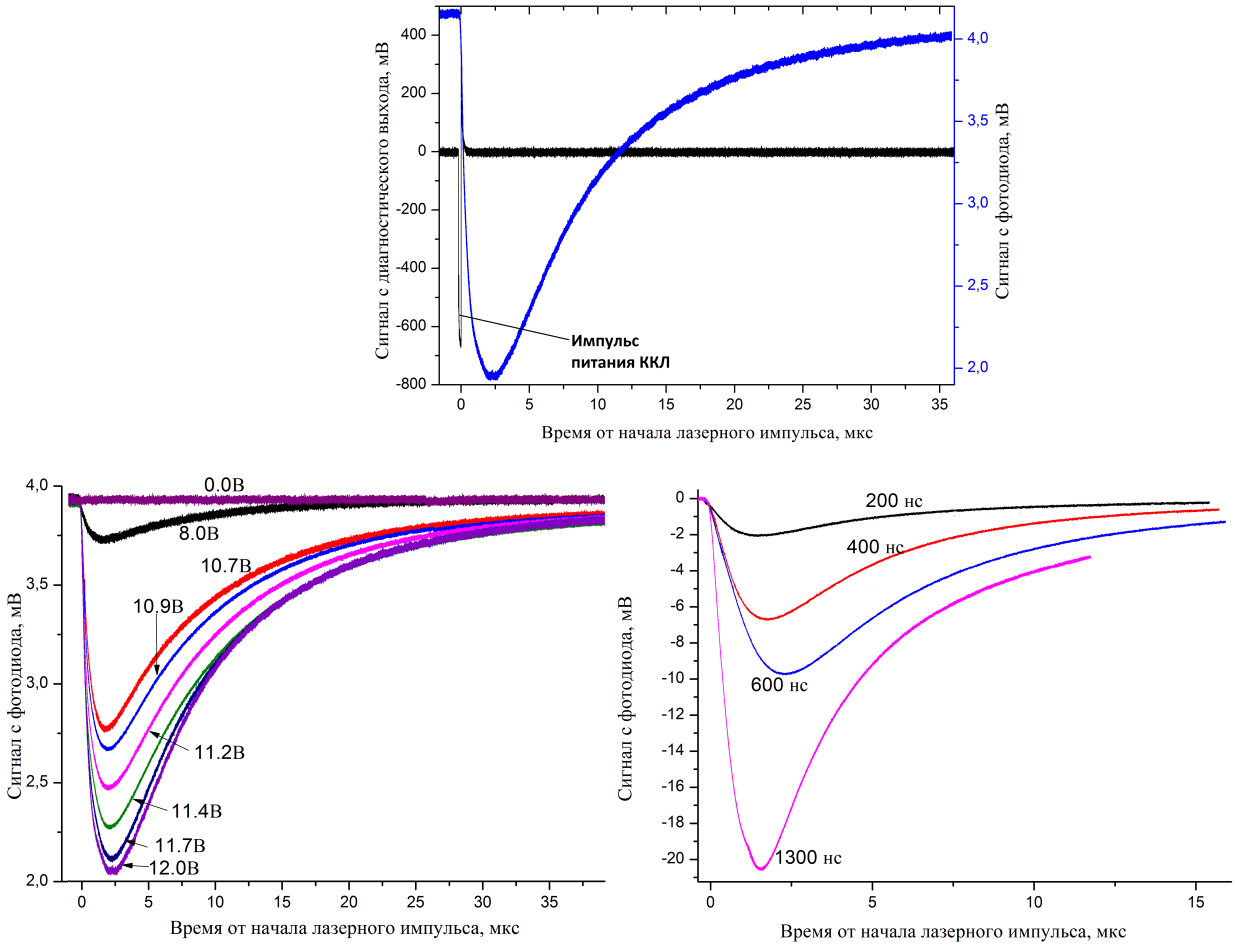

Рис. 2. Осциллограммы сигнала детектора InGaAs: вверху — типичная осциллограмма, слева внизу — при разных приложенных к структуре ККЛ напряжениях, справа внизу — при разной длительности импульса на ККЛ при неизменном значении электрического напряжения 12 В

Совместно с записью осциллограмм регистрировалось распределение интенсивности излучения с помощью профилометра. Распределения для крайних значений исследованного диапазона напряжений представлены на рис. 3 справа и слева вверху.

Интенсивность излучения, пропорциональная интегрированному значению уровней серого полученного распределения, при значении электрического напряжения 12 В в два раза ниже, чем при значении 0 В. Так как экспозиция пироэлектрического профилометра много больше величин длительностей импульсов питания ККЛ и эффекта, то для выделения модуляции интенсивности излучения кадры обрабатывались. На рис. 3 снизу приведены обработанные кадры, полученные как абсолютное значение разности текущего кадра и кадра при нулевом напряжении. Таким образом удалось выделить абсолютную величину отклонения распределения интенсивности. С ростом напряжения растет интегральный сигнал в обработанных кадрах, что соответствует спаду интеснивности излучения, прошедшего через ККЛ. Пространственная неоднородность распределений связана с многомодовостью волновода ККЛ.

Эффект модуляции интенсивности излучения лазера, прошедшего через волноводную структуру ККЛ, наблюдаемый при приложении к структуре электрического поля, может быть объяснен следующим образом. Во-первых, квантово-размерным эффектом Штарка — с ростом поля пик экситонного поглощения смещается в область более низких энергий [5]. Во-вторых, разогревом активной области при протекании электрического тока — с ростом температуры активной области уменьшается ширина запрещенной зоны, а также смещается пик экситонного поглощения в том же направлении [6]. Оба механизма являются причиной роста поглощения излучения зондирующего лазера. В отсутствие поля и, следовательно, тока через активную область структура начинает охлаждаться, что приводит к восстановлению экситонного спектра и уровня пропускания структуры.

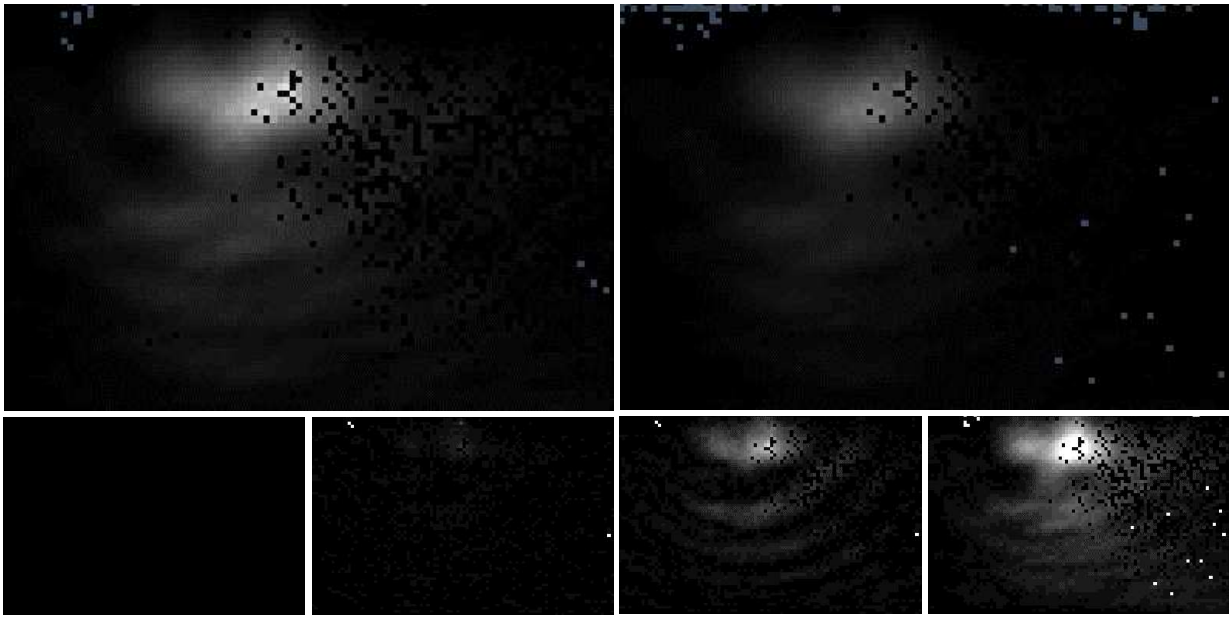

Рис. 3. Кадры, зарегистрированные профилометром: 2 верхних — для 0 В и для 12 В; 4 нижних — обработанные для 0 В, 4 В, 8 В, 12 В (слева направо) с вычетом кадра для 0 В

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружен эффект модуляции интенсивности излучения узкоспектрального лазера диапазона 1590 нм, прошедшего через волноводную структуру квантового каскадного лазера, наблюдаемый при приложении к структуре электрического поля, зарегистрированный с использованием фотодиода и профилометра. Максимум величины поглощения 50% достигается за время 3 мкс, а характерное время терморелаксации составляет 9 мкс.

Показано, что эффект может быть объяснен действием двух механизмов: квантово-размерным эффектом Штарка и разогревом активной области. Наблюдаемый эффект может быть использован для определения температуры активной области ККЛ, характерных времен разогрева и терморелаксации, что необходимо при реализации высокочастотных систем оптической связи.

Данная работа была выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025») и при поддержке национального проекта «Наука и университеты» (проект FSWR-2024-0004) за счет субсидии федерального бюджета на финансовое обеспечение государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ.

[1] *Vitiello M.S., Scalari G., Williams B.* et al. // Optics Express. **23**(4), 5167 (2015)
[2] *Vrubel I., Cherotchenko E., Mikhailov D.* et al. // Nanomaterials. **13(23), 2994 (2023)**
[3] *Cherotchenko E., Dudelev V., Mikhailov D.* et al. // Nanomaterials. **12**(22), 3971 (2022)
[4] *Babichev A.V., Gladyshev A.G., Filimonov A.V.* et al. // Techn. Phys. Lett. **43**, 666 (2017)
[5] *Miller D.A.B.* //Optical Physics of Quantum Wells. Rm. 4B-401, AT&T Bell Laboratories Holmdel, NJ07733-3030, USA, 1991.
[6] *Kopylov O., Lee Jungil, Han Ilki* et al. // Journal of the Korean Physical Society, **60**(10), 1828 (2012)

Intensity Modulation of Narrow-Linewidth IR Laser Radiation During Tansmission Through a Quantum Cascade Laser Structure

S. A. Chakhlov[1,2,3a], L. A. Miklashevich[3], A. A. Lastovkin[3], N. G. Zakharov[3]

[1]Department of General Physics and Wave Processes, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia
[2]*Branch of Lomonosov Moscow State University in Sarov. Sarov 607188, Russia*
[3]*Institute of Laser Physics Research, RFNC-VNIIEF. Sarov 607188, Russia*
E-mail: [a] *chahlov@yandex.ru*

The effect of intensity modulation of narrow-linewidth laser radiation in the 1590 nm range, transmitted through the waveguide structure of a quantum cascade laser, has been obtained and observed upon application of an electric voltage to the structure. This effect reveals the thermodynamic behaviour of the active region of a quantum cascade laser operating in a pulsed mode, which is relevant to the task of optical communication based on the principle of high-frequency amplitude signal modulation.

PACS: 42.55.Px
Keywords: quantum cascade laser, modulation, narrow-linewidth laser, excitons.
Received 27 November 2025.
English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Чахлов Сергей Александрович — ст. науч. сотрудник; тел.: (83130) 4-47-52,. e-mail: chahlov@yandex.ru.
2. Миклашевич Леонид Андреевич — инженер-исследователь 3 категории; тел.: (83130) 4-47-52.
3. Ластовкин Артем Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, нач. научно-исследовательской лаборатории; тел.: (83130) 4-47-52.
4. Захаров Никита Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, нач. научно-исследовательского отделения.