

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.373.826

**ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР С КОРОТКИМ
ТАНДЕМНЫМ ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ**

©2024 г. А. К. Чернышов^{а,*}, П. А. Михеев^а

^аСамарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

*e-mail: chak@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 11.09.2023 г.

Принята к публикации 19.10.2023 г.

Разработана конфигурация короткого внешнего резонатора, обеспечивающая одночастотный режим генерации квантово-размерных диодных лазеров с широкой полосой оптического усиления. Особенностью предлагаемого внешнего резонатора является применение в качестве возвратного зеркала резонансного отражателя, образованного двумя тонкими (толщиной около 100 мкм) покровными стеклами. Лазер HL8338MG, снабженный подобным коротким внешним резонатором, позволил продемонстрировать непрерывную перестройку оптической частоты в области 100 ГГц и дискретную перестройку длины волны в интервале 12.3 нм при выходной мощности около 20 мВт. Пригодность указанного диодно-лазерного источника для спектроскопии газов подтверждена наблюдением трех линий поглощения Кг в области 829 нм в высокочастотном разряде низкого давления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует способ улучшения спектральных характеристик диодных лазеров (ДЛ) с резонатором Фабри–Перо (ФП), основанный на использовании слабой оптической обратной связи от тонкой стеклянной пластинки, установленной вблизи выходной лазерной грани [1]. Подобная пластинка совместно с гранью кристалла образуют дополнительный ФП-эталон, который обеспечивает одномодовую генерацию с учетом конкуренции по усилению собственных мод ДЛ. Эта конфигурация ДЛ-излучателей, получившая название диодный лазер с коротким внешним резонатором (ДЛКВР), отличается простотой реализации и расширенным интервалом непрерывной перестройки без просветления граней. Однако

применение в ДЛКВР-конфигурации современных диодных лазеров с квантовыми ямами, у которых ширина контура оптического усиления достигает примерно 100 нм [2], затруднено, поскольку для получения одномодовой генерации межмодовый интервал внешнего резонатора должен быть сопоставим с полосой усиления. Другими словами, в случае ДЛ с квантовыми ямами стеклянную пластинку необходимо подводить практически вплотную к кристаллу, что повышает опасность повреждения излучателя. Мы устранили это препятствие, воспользовавшись эффектом нониуса, который возникает при прохождении света через два интерферометра с приблизительно равными длинами и приводит к прореживанию резонансов [3]. В результате “толстый” тандемный интерферометр оказывается эквивалентен “тонкому” эталону с большим межмодовым интервалом. В приложении к ДЛКВР это означает, что вместо одной стеклянной пластинки, практически прижатой к лазерной грани, можно использовать стопку из двух пластинок, размещенную на безопасном удалении от полупроводникового кристалла. Отметим, что рассмотренная в работе [4] похожая конфигурация ДЛКВР из-за сложной конструкции возвратного резонансного отражателя с электростатической системой настройки трудно повторима.

В настоящей работе продемонстрировано, что добавление к диодному лазеру с квантовыми ямами внешнего тандемного отражателя, образованного парой тонких стеклянных пластинок, позволяет получить одночастотную генерацию с диапазоном непрерывной токовой перестройки до 100 ГГц и интервалом дискретной температурной перестройки 12.3 нм. При этом подбором тока накачки, температуры кристалла и положения стеклянных пластинок ДЛ-излучатель может быть настроен практически на любую длину волны в диапазоне дискретной перестройки. Применимость предлагаемого перестраиваемого лазерного излучателя в спектроскопии подтверждается наблюдением в плазме высокочастотного разряда трех линий криптона около 829 нм.

2. КОНСТРУКЦИЯ ТАНДЕМНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Конструкция ДЛКВР на основе тандемного отражателя показана на рис. 1 (слева). В качестве источника излучения использовался диодный лазер HL8338MG (Hitachi) с несколькими квантовыми ямами в активной области и предварительно удаленной защитной крышкой. Лазер был установлен в медный держатель, прикрепленный к элементу Пельтье для термостабилизации. Фокусировка лазерного излучения в параллельный пучок выполнялась с помощью микрообъектива ($F = 6$ мм, $NA = 0.5$). Важной особенностью использованного микрообъектива было значительное (около 2 мм) расстояние от внешней поверхности первой

Рис.1

линзы до точки переднего фокуса. Это позволяло установить в промежутке между микрообъективом и гранью лазерного кристалла внешний резонансный отражатель.

Конструктивно резонансный тандемный отражатель представлял собой два покровных стекла от микроскопа размером 20×20 мм² и толщиной около 100 мкм, которые были собраны в пакет с воздушным зазором 100–150 мкм. Пакет покровных стекол был прикреплен к стандартной двухкоординатной L-образной оправе, размещенной вблизи лазерного держателя и коллимирующего микрообъектива. С помощью винтов оправы осуществлялись прецизионные изменения линейного и угловых положений покровных стекол относительно выходной грани лазера. Тем самым выполнялась настройка резонансного отражателя на селекцию заданной лазерной моды вблизи вершины контура усиления ДЛ-излучателя. В свою очередь, положение вершины контура усиления лазера можно смещать в диапазоне длин волн изменением температуры полупроводникового кристалла.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В экспериментах питание и термостабилизация лазера осуществлялись от контроллера тока/температуры (ITC4001, Thorlabs). Непрерывная перестройка лазерной частоты выполнялась с помощью пилообразного изменения тока накачки ДЛ. Для этого на управляющий вход контроллера подавался треугольный сигнал от внешнего генератора АКПП-3408/2 с частотой 40 Гц. Коллимированное излучение диодного лазера с мощностью около 20 мВт проходило через оптический изолятор (30 дБ, Thorlabs), а затем разделялось по трем оптическим каналам. В первом канале был размещен конфокальный интерферометр-1 (резкость $F = 25$, область свободной дисперсии $FSR = 1.38$ ГГц) для контроля режима одночастотной генерации во время токовой перестройки частоты. Во втором канале был установлен спектрометр AvaSpec-3648 (Avantes) для оценки интервала дискретной перестройки диодного лазера или плоский ФП-интерферометр-2 ($F = 14$, $FSR = 50$ ГГц) для контроля вдоль больших (более 50 ГГц) интервалов непрерывной перестройки. Третий оптический канал использовался для выполнения спектроскопии метастабильных атомов Kr. В нем размещалась отпаянная трубка с криптоном (Electro-Technic Products), в которой с помощью маломощного генератора с частотой 50 МГц возбуждался высокочастотный разряд [5]. Зондирующий лазерный пучок вводился в область разряда через боковую стенку трубки перпендикулярно к ее оси. Регистрация оптических сигналов во всех каналах выполнялась с помощью кремниевых фотоприемников OPT-101 (Texas Instruments), выходные сигналы от которых поступали на двухканальный осциллограф или 16-разрядный аналого-цифровой

преобразователь (National Instruments) для оцифровки и последующей обработки на компьютере.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 (справа) показаны резонансы пропускания двух контрольных интерферометров, прописанные с помощью ДЛКВР при фиксированной температуре корпуса лазера $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пилообразном изменении тока накачки. Видно, что при линейном возрастании лазерного тока от 23 до 75 мА наблюдается 74 резонанса интерферометра-1 ($\text{FSR} = 1.38\text{ ГГц}$) и три резонанса интерферометра-2 ($\text{FSR} = 50\text{ ГГц}$). При этом картины резонансов (особенно интерферометра-2) не содержат каких-либо скачкообразных изменений, что свидетельствует о непрерывности перестройки ДЛКВР в интервале частот примерно до 100 ГГц. Повышение амплитуды резонансов на рис. 1 с током накачки вызвано ростом выходной лазерной мощности, а заметное сгущение картины резонансов в области больших токов говорит о нелинейном характере токовой перестройки диодного лазера. По форме резонансов интерферометра-1, записанных при небольшой амплитуде сканирования лазерного тока, установлено, что ширина линии генерации ДЛКВР не превышала примерно 70 МГц.

Рис. 2

На рис. 2 представлена часть эмиссионного спектра криптона, зарегистрированная с помощью спектрометра AvaSpec-3648 в излучении разрядной ячейки. На спектр Кг наложены пять спектров излучения ДЛКВР, которые были записаны при различных температурах излучателя и токе накачки около 50 мА. Лазерные спектры в верхней части рис.2, полученные при минимальной $T_{\min} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка росы) и максимальной $T_{\max} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (определена производителем) температурах излучателя, демонстрируют доступный спектральный интервал величиной $\Delta\lambda = 12.3\text{ нм}$, центрированный на 829 нм. Вычисленный по данным рис. 2 коэффициент дискретной температурной перестройки диодного лазера равен $\partial\lambda/\partial T = 0.27\text{ нм}/^{\circ}\text{C}$, что согласуется с паспортным значением $0.23\text{ нм}/^{\circ}\text{C}$. Настройку ДЛКВР на три линии Кг, которые попадают в перекрываемый спектральный диапазон, демонстрируют лазерные спектры на рис. 2 и сигналы на рис. 3, пропорциональные интенсивности лазерного пучка, прошедшего через разрядную трубку.

Рис. 3

Одновременное наблюдение линии поглощения Кг и резонансов интерферометра удобно использовать для определения токового или температурного коэффициентов непрерывной перестройки диодного лазера. Результаты подобных измерений при токовой перестройке лазерной частоты показаны на рис. 4. При постоянной составляющей тока накачки 52.7 мА линия Кг оказывается смещенной влево на 29.7 ГГц (рис. 4а). При уменьшении постоянной составляющей тока до 39.5 мА сдвиг наблюдаемой линии

Рис. 4

поглощения сокращается до 3.45 ГГц (рис. 4б). Вычисленный по данным рис. 4 коэффициент непрерывной токовой перестройки равен 2 ГГц/мА. Аналогичным образом при изменении с помощью элемента Пельтье температуры ДЛ-излучателя на $\Delta T \sim 1$ °С установлено, что коэффициент непрерывной температурной перестройки составляет 24 ГГц/°С. Эта величина оказалась в 5 раз меньше значения 0.27 нм/°С, определенного по данным рис. 2, что объясняется вкладами от переключений мод в интервал дискретной спектральной перестройки при изменении температуры диодного лазера на $\Delta T \sim 45$ °С.

Сравним характеристики ДЛКВР с внешним тандемным отражателем и параметры коммерческих диодных лазеров с протяженными внешними резонаторами, применяемыми в спектроскопических исследованиях. В работе [6] сообщалось о Vortex 6015 (New Focus), который обеспечивал непрерывную перестройку излучения с длиной волны 772 нм в области 90 ГГц при ширине лазерной линии менее 100 МГц. Для наблюдения линии Ar с длиной волны 811.5 нм в работе [7] использовался DL-100 (Toptica) с диапазоном непрерывной перестройки 24 ГГц и шириной линии около 10 МГц. Необходимо также отметить, что ДЛКВР с тандемным отражателем был апробирован нами с другими типами диодных лазеров с квантовыми ямами. В работе [5] ДЛ-излучатель L808P030 (Thorlabs), снабженный резонансным отражателем, был использован для спектроскопии линий аргона с длиной волны 811 нм. Здесь дискретный интервал перестройки составил 3 нм при изменении лазерной температуры на 20 °С, диапазон непрерывной перестройки достигал 36 ГГц, а ширина лазерной линии была на уровне 50 МГц. В работе [8] с помощью ДЛКВР на основе лазера HL6362MG (Hitachi) измерены коэффициенты столкновительного уширения и сдвига для линии неона с длиной волны 640.3 нм. Этот излучатель обеспечивал непрерывную перестройку в области 30 ГГц при изменении тока накачки и ширину лазерной линии около 50 МГц. В работе [9] ДЛКВР с излучателем ELD83NPT50 (Roithner Lasertechnik) использован для наблюдения линий поглощения H₂O в комбинационной полосе (0,0,0–2,1,1) около 830 нм. В этом случае достигнута непрерывная токовая перестройка лазерной частоты в области 100 ГГц и дискретная температурная перестройка излучаемой длины волны при 7.6 нм при ширине линии генерации около 200 МГц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлена простая в реализации конфигурация короткого тандемного внешнего резонатора, обеспечивающая одночастотный режим генерации квантово-размерных диодных лазеров с широкой полосой оптического усиления. По нашему мнению, подобные ДЛКВР вполне могут конкурировать с коммерческими диодными

лазерами с протяженными внешними резонаторами при исследовании спектральных линий, ограниченных доплеровским уширением, когда важен большой интервал непрерывной перестройки при умеренных требованиях к ширине лазерной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zybin A., Niemax K.* // *Spectrochim. Acta Part B.* 1997. V. 52(8). P. 1215.
[https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(97\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(97)00013-X)
2. *Woodworth S.C., Cassidy D.T., Hamp M.J.* // *Appl. Opt.* 2001. V. 40(36). P. 6719.
<https://doi.org/10.1364/AO.40.006719>
3. *Jennings D. E.* // *Appl. Opt.* 1980. V. 19(1). P. 2. doi: 10.1364/AO.19.000002
4. *Sidorin Y., Karioja P., Blomberg M.* // *Optics Commun.* 1999. V. 164(1-3). P. 121.
[https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00166-2](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00166-2)
5. *Chernyshov, A.K., Mikheyev, P.A., Lunev, N.N., Azyazov, V.N.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 999(1). P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/999/1/012010>
6. *Leiweke R.J., Ganguly B.N.* // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113(14). P. 143302
<https://doi.org/10.1063/1.4800556>
7. *Niermann, B., Böke, M., Sadeghi, N., Winter, J.* // *Eur. Phys. J. D.* 2010. V. 60. P. 489.
<https://doi.org/10.1140/epjd/e2010-00166-8>
8. *Chernyshov A.K., Mikheyev P.A., Ufimtsev N.I.* // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2021. V. 258. P. 107368. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107368>
9. *Чернышов А.К., Воронцова Е.А.* // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013. Т. 15(6). С. 135.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Конфигурация диодного лазера с коротким тандемным внешним резонатором. Возвратное зеркало образовано двумя покровными стеклами (**а**). Непрерывная перестройка ДЛКВР в области 100 ГГц (**б**). Резонансы интерферометра-1 и интерферометра-2 показаны при линейном увеличении тока накачки на $\Delta I \sim 50$ мА и постоянной температуре корпуса лазера $T = 19.8$ °С.
- Рис. 2.** Эмиссионный спектр криптона и спектры излучения ДЛКВР. Переходы, соответствующие наблюдаемым линиям, обозначены в системе Пашена. Два верхних спектра (для $T_{\min} = 15$ °С и $T_{\max} = 60$ °С) определяют перекрываемый лазером спектральный интервал, а три нижних спектра демонстрируют грубую настройку ДЛКВР на доступные линии Кг.
- Рис. 3.** Точная настройка ДЛКВР на линии Кг: **а** – 826.3 нм, **б** – 828.1 нм, **в** – 829.4 нм. Температуры лазера соответствуют данным рис. 2 в зависимости от линии Кг. Постоянные составляющие тока накачки устанавливались в интервале 30–60 мА. Внизу показаны резонансы интерферометра-1 ($FSR = 1.38$ ГГц).
- Рис. 4.** Определение коэффициента токовой перестройки лазерной частоты. Верхний сигнал показывает положение линии криптона, а нижний сигнал соответствует резонансам интерферометра-1. При измерениях температура корпуса лазера ($T = 23.5$ °С) и амплитуда сканирования тока накачки ($\Delta I = 14$ мА) не изменялись, а постоянная составляющая лазерного тока устанавливалась равной 52.7 мА (**а**) и 39.5 мА (**б**).

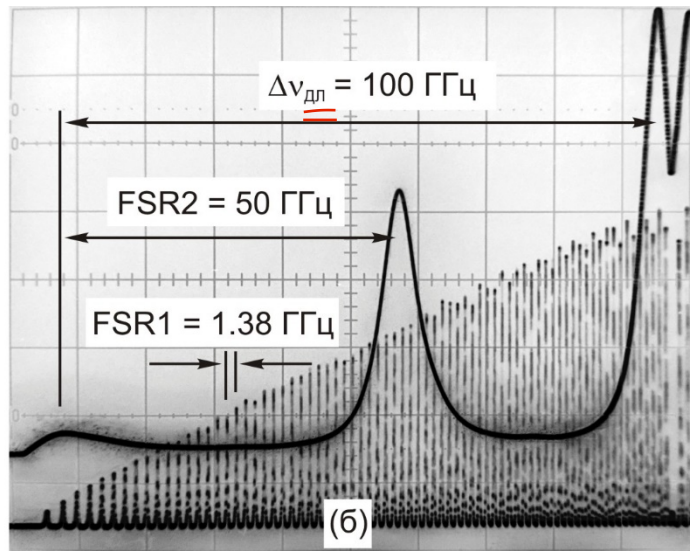
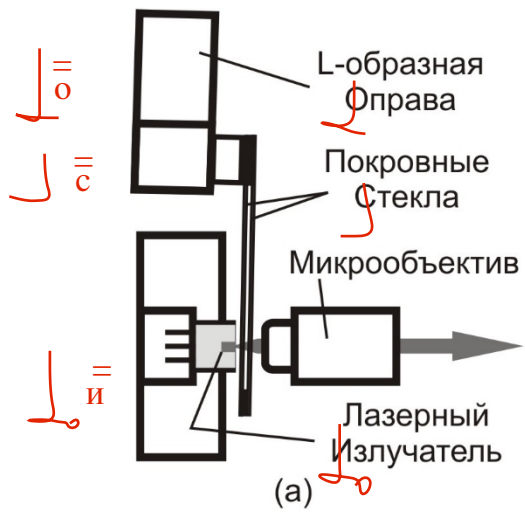


Рис. 1.

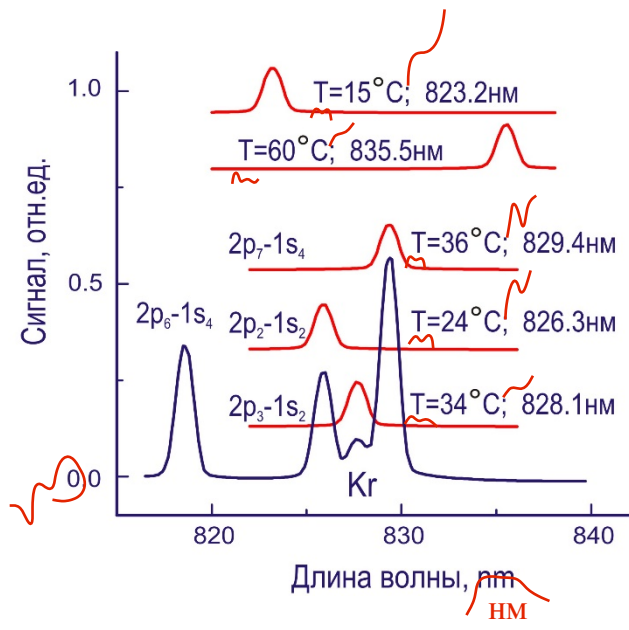


Рис. 2.

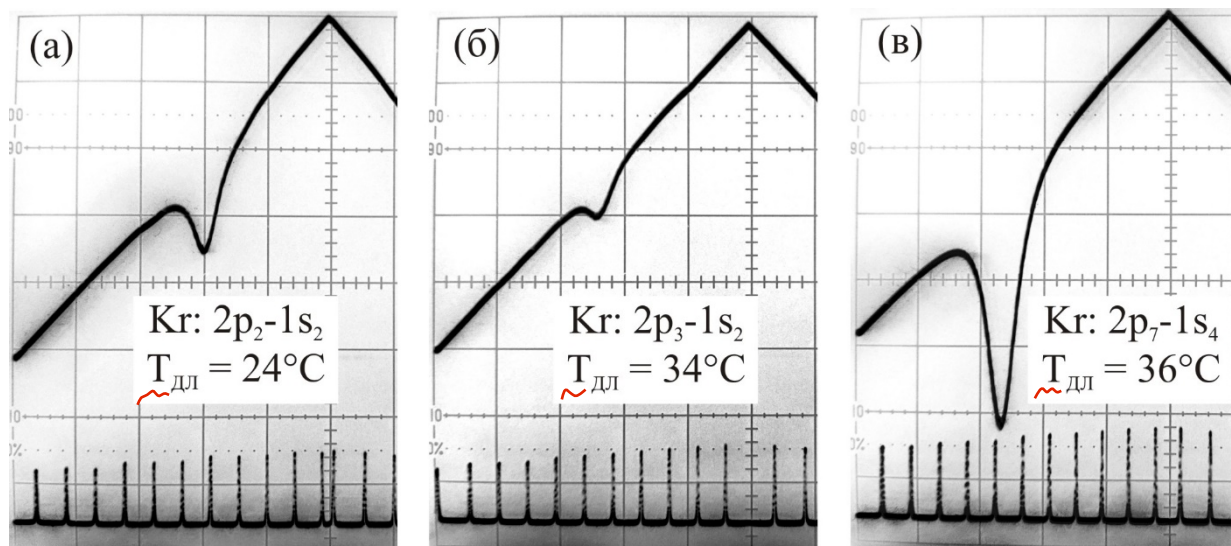


Рис. 3.

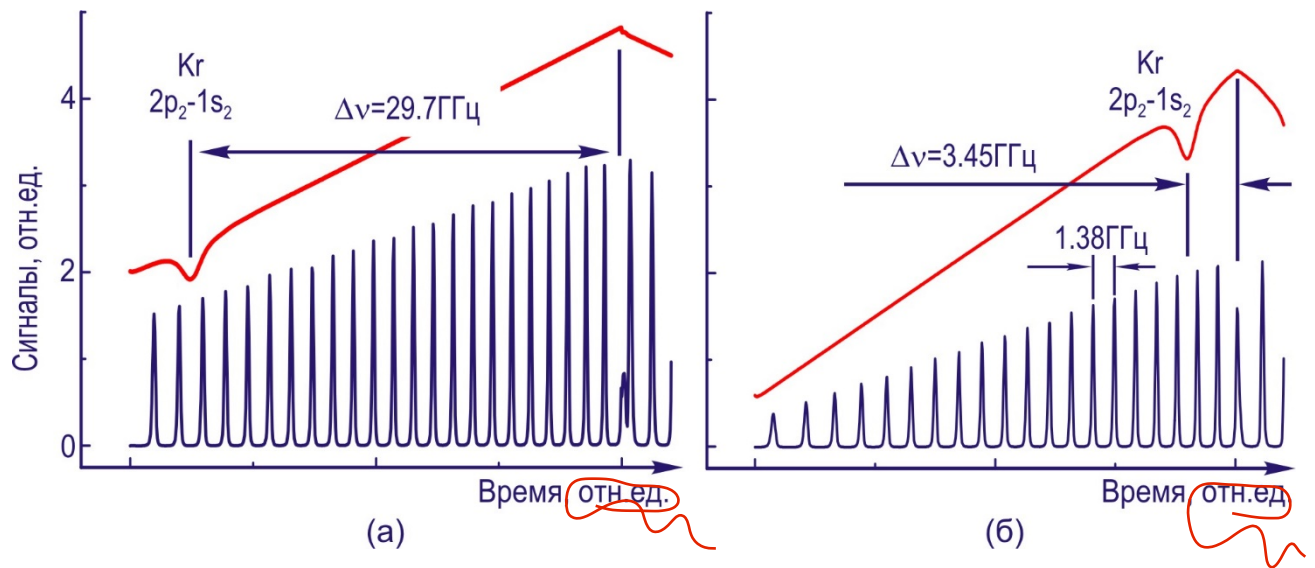


Рис. 4.

Для связи с автором:

Чернышов Александр Константинович

Тел.: 8-937-657-53-23 (моб.)

E-mail: chak@fian.smr.ru

Для переводчика:

TUNABLE DIODE LASER WITH SHORT TANDEM EXTERNAL CAVITY

A. K. Chernyshov, P. A. Mikheyev

P.N. Lebedev Physical Institute, Samara branch

221 Novo-Sadovaya st., Samara, Russia, 443011

e-mail: chak@fian.smr.ru

A short external cavity (e.c.) has been developed, providing a single frequency lasing of quantum-well diode lasers with broad optical gain profiles. A feature of the proposed e.c. is the use of a resonant reflector formed by two thin (with thickness of approximately 100 μm) cover glasses as a return mirror. The HL8338MG laser equipped with a similar short e.c. made it possible to demonstrate the continuous optical frequency tuning within 100 GHz and discrete wavelength tuning in the 12.3 nm range with an output power of about 20 mW. The applicability of such a tunable diode laser source for gas spectroscopy was confirmed by the observation of three krypton absorption lines near 829 nm in a low-pressure high frequency discharge.