

# Техника импульсной оптической накачки и импульсного возбуждения микроволновых резонансов по схеме Рэмси в $^{87}\text{Rb}$ -ячейке с буферным газом

В.Н.Барышев, М.С.Алейников, Г.В.Осипенко, И.Ю.Блинов

*Разработан лабораторный прототип малогабаритного квантового стандарта частоты на основе рубидиевой газовой ячейки с импульсной лазерной накачкой. Ожидается, что при значительно меньших габаритах (объем  $\sim 10$  л, масса  $\sim 10$  кг) кратковременная нестабильность такого стандарта частоты будет сравнима с нестабильностью промышленных пассивных водородных генераторов частоты и даже лабораторных квантовых стандартов частоты фонтанного типа на медленных атомах. Дано обоснование преимуществ техники импульсной оптической накачки и импульсного возбуждения микроволновых резонансов по сравнению с традиционной техникой детектирования двойного радиооптического резонанса. Представлены результаты экспериментального исследования реализованного во ВНИИФТРИ метода импульсной оптической накачки рубидиевой ячейки со смесью буферных газов Ar–Ne, получены резонансы Рэмси и описан процесс оптимизации контраста центрального резонансного пика.*

**Ключевые слова:** квантовый стандарт частоты на рубидиевой газовой ячейке, импульсная оптическая накачка, микроволновое возбуждение по схеме Рэмси, диодный лазер, спектроскопия насыщенного поглощения, спектроскопия с переносом модуляции, акустооптический модулятор, дифракция Рамана–Ната.

## 1. Введение

В настоящее время существует насущная потребность в компактных (масса  $\sim 10$  кг, объем  $\sim 10$  л) квантовых стандартах частоты (КСЧ), имеющих кратковременную нестабильность менее  $5 \times 10^{-13}$  за время усреднения 1 с и долговременную на уровне нескольких единиц  $10^{-15}$  за время усреднения  $10^5$  с, которые могут применяться в радионавигационных системах, а также для синхронизации телекоммуникационных сетей и локальных шкал времени, включая бортовые. Однако существующие микроволновые КСЧ (к которым относятся атомно-лучевые трубки с магнитной селекцией атомных состояний, атомно-лучевые трубки с лазерной накачкой, стандарты частоты фонтанного типа на холодных атомах, водородные стандарты частоты активного типа, пассивные водородные стандарты частоты, стандарты частоты на рубидиевых газовых ячейках с ламповой оптической накачкой) не удовлетворяют современным требованиям к бортовым КСЧ бурно развивающихся глобальных навигационных спутниковых систем, включая ГЛОНАСС, по каким-либо параметрам (нестабильность, массогабаритные параметры, энергопотребление, надежность эксплуатации).

По нестабильности к выше перечисленным КСЧ наиболее близки пассивные водородные стандарты частоты, а по массогабаритным параметрам и надежности – стандарты частоты на рубидиевых газовых ячейках. Хотя существующие промышленные рубидиевые стандарты частоты (РСЧ), разработанные по технологии двойного ра-

диооптического резонанса в ячейке с ламповой накачкой, демонстрируют удовлетворительные характеристики и высокую надежность в бортовом и наземном вариантах эксплуатации, их нестабильность принципиально не может быть лучше  $10^{-12}$  за 1 с, что намного превышает предельный уровень, определяемый дробовыми шумами процесса фотодетектирования часового сигнала.

Нестабильность  $\sigma(\tau) \approx (4 \times 10^{-12} - 3 \times 10^{-11})\tau^{-1/2}$  (за время усреднения  $\tau = 1 - 10^3$  с) частоты часового перехода промышленных РСЧ, разделяющихся по метрологическим характеристикам на потребительские группы коммерческого, военного и космического применения, определяется, главным образом, сильной ее зависимостью от нестабильности интенсивности и частоты оптического излучения вследствие эффекта светового сдвига (динамического эффекта Штарка), что является общим недостатком микроволновых стандартов частоты с непрерывной ламповой и даже лазерной оптической накачкой [1].

Однако еще в 1960-х годах была предложена идея [2], реализация которой позволила бы значительно уменьшить величину светового сдвига и, следовательно, нестабильность стандартов частоты на газовых ячейках с оптической накачкой. Она заключалась в разделении во времени трех рабочих фаз КСЧ: оптической накачки, импульсного микроволнового опроса по схеме Рэмси и оптического детектирования. Взаимное влияние различных сигналов минимизировано, и часовой переход происходит тогда, когда лазерное излучение в ячейке отсутствует, что приводит к существенному подавлению светового сдвига. Современные технологические возможности использования диодных лазеров и цифровой электроники позволили чрезвычайно эффективно реализовать эту оригинальную идею [3–5]. В [3] показано, что частотная нестабильность лабораторного варианта малогабаритного стандарта частоты на рубидиевой ячейке со смесью буферных газов с импульсной оптической накачкой (ИОН) и импульсным микроволновым возбуждением по схеме

В.Н.Барышев, М.С.Алейников, Г.В.Осипенко, И.Ю.Блинов. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: baryshev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 21 февраля 2018 г., после доработки – 12 марта 2018 г.

Рэмси составила около  $2 \times 10^{-13}$  и  $2 \times 10^{-15}$  за время усреднения 1 и  $10^4$  с соответственно с суточным дрейфом частоты менее  $1 \times 10^{-14}$ .

Следует отметить, что в настоящее время разрабатывается альтернативный вариант построения КСЧ на газовых ячейках – это КСЧ с импульсным возбуждением резонансов когерентного пленения населенности (КПН) [6, 7]. Хотя техника непрерывного возбуждения КПН-резонансов в газовых ячейках с буферным газом и позволяет получать узкие (шириной 25–50 Гц) линии часового перехода, рекордные стабильности КСЧ на основе КПН-эффекта составляют всего лишь несколько единиц  $10^{-12}$  за время усреднения 1 с.

В технике импульсного возбуждения КПН-резонансов [6] в ячейке с буферным газом по схеме Рэмси эволюция когерентности атомных состояний, формирующих часовой переход, так же как и в технике ИОН, происходит в отсутствие лазерного излучения в ячейке. Контраст линии часового перехода, сравнимый по величине с контрастом, получаемым в технике ИОН [7], зависит только от длительности первого импульса КПН-возбуждения и длительности интервала между ним и импульсом детектирования. Поскольку в технике импульсного возбуждения КПН-резонансов в ячейке с буферным газом по схеме Рэмси СВЧ резонатор не применяется, конструкция КСЧ, построенного в соответствии с этим принципом, упрощается, а массогабаритные параметры физической части КСЧ могут быть уменьшены. Однако создание необходимого для возбуждения КПН-резонансов двухчастотного лазерного излучения сопровождается увеличением объема лазерного узла КСЧ, если это излучение формируется двумя коррелированными по фазе лазерными источниками. Если же для получения двухчастотного излучения используется излучение единственного лазера, модулированного по фазе электрооптическим модулятором, то во избежание дополнительного светового сдвига частоты часового перехода необходимо приложить усилия для подавления в спектре излучения нежелательных нерезонансных компонент [7].

В настоящей статье представлены результаты по созданию лабораторного прототипа рубидиевого КСЧ с ИОН. Дано краткое описание физической части лазерной системы, формирующей излучение на длине волны, соответствующей  $D_2$ -линии атома Rb, узла спектроскопии с интегрированными акустооптическими модуляторами (АОМ), выполняющими функции оптического фазового модулятора и генератора оптических импульсов, системы формирования опросного СВЧ сигнала (6.834 ГГц) и цифровой системы управления, формирующей все оптические и электрические сигналы прототипа КСЧ, включая сигнал автоматической подстройки частоты кварцевого генератора. Измерена линия Рэмси и описан процесс оптимизации контраста ее центрального пика.

## 2. Экспериментальная установка и полученные результаты

Результаты первых экспериментальных исследований метода импульсной оптической накачки  $^{87}\text{Rb}$ -ячейки, проведенных на лабораторном стенде, были представлены в [8]. В настоящее время разработка прототипа КСЧ с ИОН ведется в направлении минимизации габаритных размеров отдельных систем и узлов за счет применения компактных лазерных источников и специальных акустооп-

тических устройств, а также в направлении поиска спектроскопических методов, обеспечивающих долговременную стабильность параметров автоматической подстройки частоты лазерного излучения.

Наш прототип КСЧ с ИОН состоит из трех основных частей: физической части, содержащей  $^{87}\text{Rb}$ -ячейку со смесью буферных газов Ag–Ne при суммарном давлении 14.7 Тор и отношении парциальных давлений 0.5, помещенную в цилиндрический резонатор; лазерной системы с узлами спектроскопии и генератора оптических импульсов; синтезатора опросного сигнала (6.834 ГГц) и системы управления.

Ячейка с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$ , помещенная в цилиндрический резонатор с модой  $\text{TE}_{011}$  и умеренной добротностью около 1000, содержит двухкомпонентную смесь буферных газов для компенсации столкновительного сдвига частоты часового перехода и увеличения времени локализации атомов в лазерном пучке диаметром 10 мм. Резонатор с ячейкой находится внутри соленоида, создающего продольное (вдоль оси резонатора) магнитное поле для снятия вырождения по магнитным квантовым состояниям. Физическая часть экранирована от внешних магнитных полей и термостатирована. Эта часть прототипа не претерпела изменений.

Выбор типа лазерного источника для малогабаритного КСЧ на рубидиевой газовой ячейке, а также его спектральных характеристик обоснован в детальных теоретических и экспериментальных исследованиях, представленных в [3]. Там же обоснован выбор  $D_2$ -линии ( $\lambda = 780.24$  нм) изотопа  $^{87}\text{Rb}$  для накачки и детектирования. В стандарте частоты на газовой ячейке с ИОН с микроволновым возбуждением по схеме Рэмси и оптическим детектированием часового перехода спектральная ширина излучения лазера непосредственно влияет на нестабильность частоты. Амплитудные флуктуации пробного детектирующего излучения, посредством которого формируется часовой сигнал, ограничивают кратковременную стабильность атомных часов с ИОН и оптическим детектированием. Поскольку этот дополнительный шум проявляется только во время регистрации пробного импульса лазерного излучения, его вклад в нестабильность КСЧ, выраженную в виде вариации Аллана, может быть представлен в той же форме, что и вклад шума из-за эффекта Дика [3]:

$$\sigma_y^{\text{an}}(\tau) = \frac{1}{C Q_{\text{line}}} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}^2 \left( n\pi \frac{T}{T_c} \right) S_{\text{an}}(nf_c) \right]^{1/2} \tau^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $T_c$  – продолжительность одного цикла измерений, включающего импульс накачки, два импульса Рэмси и пробный оптический импульс (рис.1);  $f_c$  – частота повторения циклов;  $T$  – интервал времени между окончанием первого и началом второго импульса Рэмси;  $C$  – контраст центрального пика получаемой линии Рэмси;  $Q_{\text{line}}$  – добротность линии;  $S_{\text{an}}(nf_c)$  – спектральная плотность мощности амплитудных шумов пробного сигнала, регистрируемого на фотодетекторе. В величине  $S_{\text{an}}(nf_c)$  учтен как остаточный шум интенсивности лазерного излучения, который переносится на пробный сигнал, так и частотные шумы излучения, конвертируемые в амплитудные флуктуации.

Для щелочных атомов цезия и рубидия при малой ширине спектра лазерного излучения (порядка 1 МГц или менее) вклад в нестабильность из-за конвертации частот-

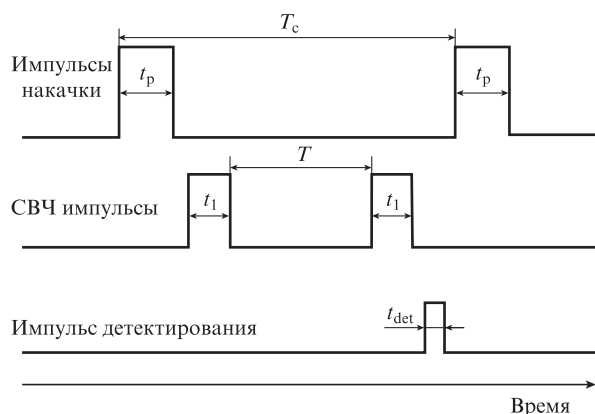


Рис. 1. Временные последовательности импульсов накачки, микроволновых импульсов и импульсов детектирования.

ных шумов в амплитудные флуктуации может быть снижен почти на порядок [3] по сравнению со вкладом в нестабильность, вносимым лазерным источником с шириной спектра излучения 10–20 МГц.

Лазерный диод с распределенным брэгговским отражением и шириной спектра излучения менее 1 МГц обеспечивает выходную мощность излучения не менее 80 мВт на длине волны 780.24 нм, что достаточно для проведения спектроскопии в парах атомов рубидия, формирования оптических импульсов накачки и детектирования, а также для пространственной фильтрации излучения, осуществляемой путем ввода части излучения в одномодовый, сохраняющий поляризацию оптоволоконный кабель (рис.2).

Универсальный узел спектроскопии позволяет проводить как спектроскопию насыщенного поглощения в контрольной рубидиевой газовой ячейке, так и спектроскопию с переносом модуляции (СПМ). Последняя осуществляется с помощью специально разработанного во ВНИИФТРИ для реализации данного спектроскопического метода АОМа, работающего в режиме дифракции

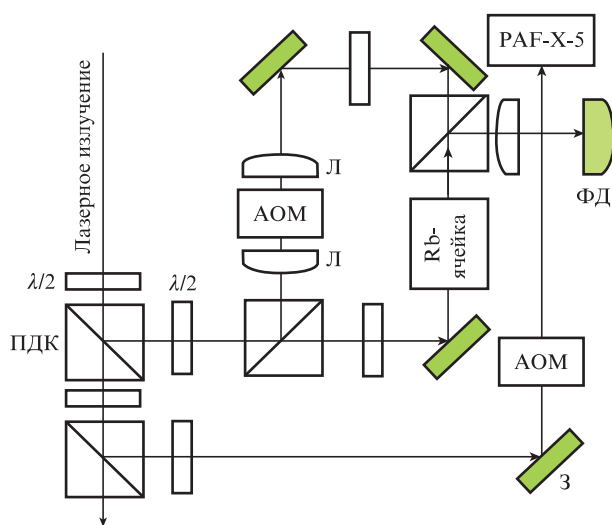


Рис.2. Схема экспериментальной установки для проведения спектроскопии насыщенного поглощения и спектроскопии с переносом модуляции:

ФД – фотодетектор; ПДК – поляризационный делительный кубик; З – зеркало; Л – линза;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка; PAF-X-5 – оптоволоконный порт.

Рамана–Ната [9, 10], в качестве фазового модулятора с полосой частот модуляции 4–10 МГц. Техника СПМ позволяет достигать высокой долговременной стабильности нуля сигнала частотной подстройки, которая не зависит от остаточных эффектов линейного поглощения, таких как изменение во времени интенсивности лазерного излучения, температурные флуктуации, флуктуации поляризации излучения или магнитного поля. Это является главным преимуществом СПМ перед другими методами частотной стабилизации диодных лазеров при создании КСЧ с высокой долговременной стабильностью.

В работах [3, 4, 8] оптимальные параметры накачки достигались сдвигом частоты лазерного излучения, привязанной в отдельной ячейке с естественной смесью изотопов атома рубидия к частоте перекрестного резонанса насыщенного поглощения  $5S_{1/2}(F=1) \leftrightarrow 5P_{3/2}(F'=1,2)$ , на –170 МГц. АОМ 1205С-2-804В (www.isomet.com) в конфигурации двойного прохода «кошачий глаз» использовался в [6] в качестве генератора оптических импульсов накачки и детектирования, оптического выключателя, а также для частотного сдвига излучения.

Для уменьшения размеров узла АОМа в конфигурации двойного прохода «кошачий глаз», состоящего из поляризационного делительного кубика, АОМа, четвертьволновой пластинки, линзы, затвора и зеркала, во ВНИИФТРИ было создано однопроходное акустооптическое устройство для сдвига частоты на –170 МГц, работающее в брэгговском анизотропном режиме дифракции (рис.3) и способное значительно, почти на порядок, уменьшить объем узла модулятора в КСЧ с ИОН.

На фиксированной частоте модуляции падающий на АОМ и дифрагированный пучки параллельны друг другу со смещением менее 0.3 мм. Угол между выходящими из АОМа пучками нулевого и первого порядков дифракции составляет  $10^\circ$ . Вследствие анизотропного характера дифракции эти пучки имеют взаимно ортогональные поляризации, что помогает разделить их, поместив на выходе АОМа поляризатор. Размер АОМа составляет  $48 \times 25 \times 23$  мм. Эффективность дифракции на длине волны излучения 780 нм при мощности подаваемого на АОМ сигнала модуляции 200 мВт была равна 85%, ширина полосы модуляции АОМа – 20 МГц, а диаметр активной аппаратуры

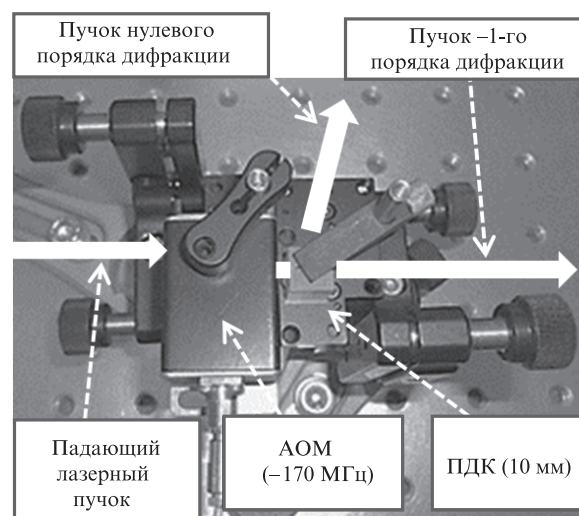


Рис.3. Однопроходный АОМ (–170 МГц), работающий в брэгговском анизотропном режиме дифракции и геометрия дифрагированных пучков (ПДК – поляризационный делительный кубик).

ры составлял 2 мм. Степень подавления излучения на выходе из АОМа (когда он включен и выключен) равнялась 49 дБ.

Чтобы выйти на уровень нестабильности, полученный в работах [3, 4], фазовые шумы синтезатора частоты 6.8 ГГц не должны вносить вклад в нестабильность, превышающий  $1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ . В нашем прототипе мы используем сигнал на частоте 6.8 ГГц, получаемый от генератора сигналов E8257D (Keysight Technologies). Измеренная для него плотность мощности фазовых шумов составляет  $-95$  и  $-105$  дБ/Гц при смещениях от несущей частоты 6.8 ГГц на 100 Гц и 1 кГц соответственно. Такой уровень шумов определяет вклад микроволнового эффекта Дика в нестабильность КСЧ, немного больший  $2 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$  и также вычисляемый по формуле (1), приведенной в работе [3].

Оптимальные параметры для нашего прототипа КСЧ с ИОН таковы: длительность импульса накачки  $t_p = 0.6$  мс, СВЧ импульса  $t_1 = 0.4$  мс, импульса детектирования  $t_{det} = 0.15$  мс, интервал времени между окончанием первого СВЧ импульса и началом второго  $T = 2.7$  мс. Продолжительность полного цикла составляет 4.37 мс, включая определенные паузы между оптическими и СВЧ импульсами. Полная ширина центрального пика линии Рэмси на полувысоте определяется известным соотношением  $\Delta\nu = 1/(2T)$ . Она нечувствительна к вариациям таких параметров, как мощность опросного микроволнового сигнала и интенсивность лазерного излучения.

На рис.4 показана типичная линия Рэмси с шириной центрального пика 185 Гц и его контрастом 40%, полученная при свипировании частоты синтезатора относительно частоты часового перехода 6.834682610 ГГц. Температура ячейки  $T_{cell} = 65^\circ\text{C}$ . В работе [8] контраст около 30% достигался при  $T_{cell} = 55^\circ\text{C}$ . Мощность излучения накачки перед входом в ячейку была равна 3.6 мВт. Поглощение детектирующего излучения при  $T_{cell} = 65^\circ\text{C}$  в импульсном режиме составляло 80%. Мы не достигли насыщения контраста линии Рэмси при повышении температуры ячейки. Выбор температуры  $T_{cell} = 65^\circ\text{C}$  определяется лишь техническими возможностями системы термостатирования.

Процедура оптимизации контраста центрального пика линии Рэмси заключалась в исследовании влияния на него длительности и интенсивности импульсов накачки и детектирования. Зависимости контраста  $C$  центрального

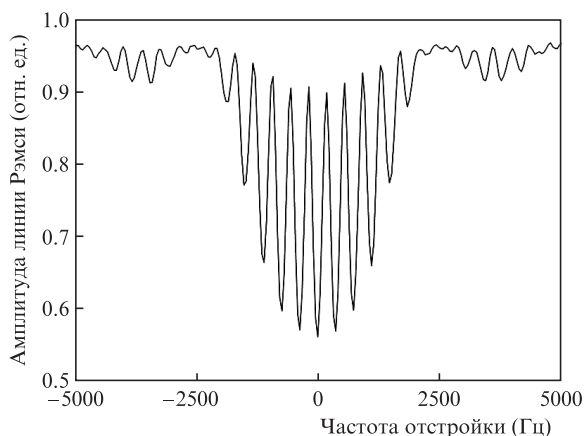


Рис.4. Амплитуда линии Рэмси с шириной центрального пика 185 Гц.

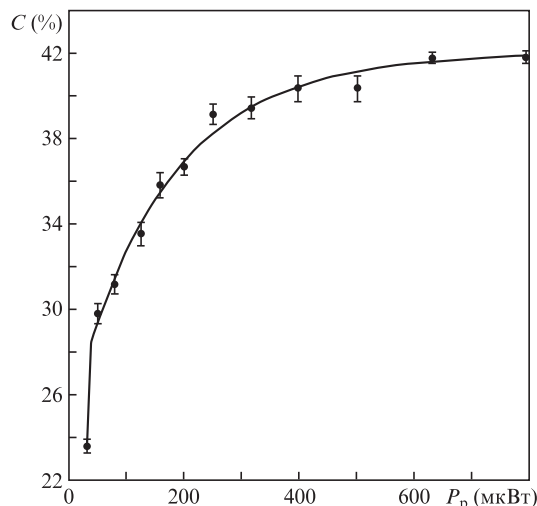


Рис.5. Зависимость контраста  $C$  центрального пика линии Рэмси от мощности  $P_p$  сигнала управления, подаваемого на АОМ для формирования импульса накачки.

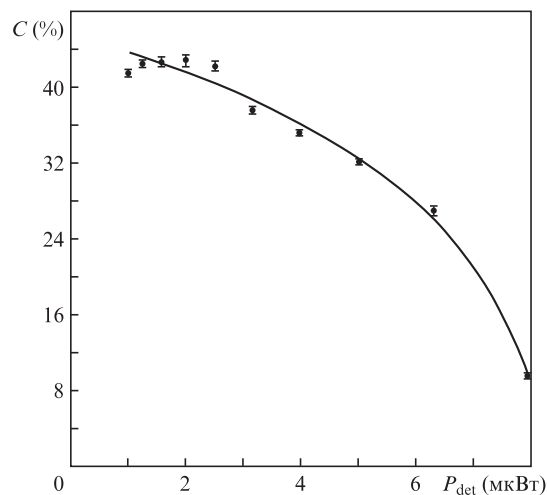


Рис.6. Зависимость контраста  $C$  центрального пика линии Рэмси от мощности  $P_{det}$  сигнала управления, подаваемого на АОМ для формирования импульса детектирования.

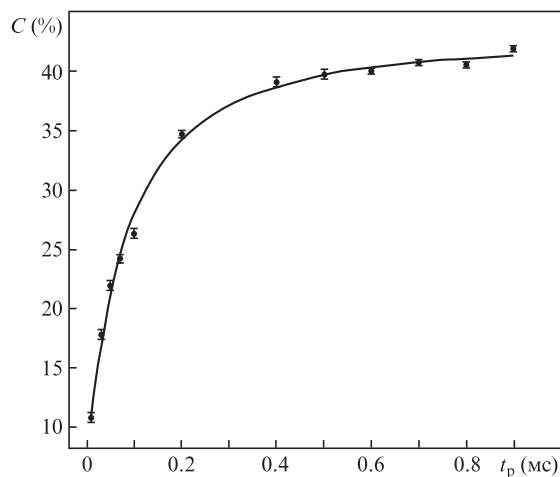


Рис.7. Зависимость контраста  $C$  центрального пика линии Рэмси от длительности  $t_p$  импульса накачки.

пика линии Рэмси от мощностей  $P_p$  и  $P_{det}$  управляющих сигналов, подаваемых на АОМ для формирования импульсов накачки и детектирования, показаны на рис.5 и 6. Зависимость  $C$  от длительности  $t_p$  импульса накачки приведена на рис.7. Рост мощности управляющего сигнала приводит к увеличению интенсивности импульсов накачки и детектирования, образуемых дифрагированным излучением АОМа.

### 3. Заключение

В работе представлены экспериментальные результаты исследования и отработки принципа действия КСЧ на рубидиевой газовой ячейке с ИОН. В процессе оптимизации длительности и интенсивности импульсов накачки и детектирования получены линии Рэмси с контрастом центрального пика, превышающим 40%.

Для долговременной частотной стабилизации лазера и формирования оптических импульсов разработаны АОМы специальной конструкции, применение которых в перспективе позволит значительно уменьшить размеры лазерно-оптической системы КСЧ с ИОН.

Выбор ИОН для создания малогабаритного стандарта частоты, помимо преимуществ, связанных с принци-

пом работы таких часов (существенное подавление светового сдвига), обусловлен высокой технологической воспроизводимостью результатов, представленных в [8] и в настоящей работе, а также в работах [3–5].

1. Beverini N., Ortolano M., Costanzo G.A., De Marchi A., Maccioni E., Marsili P., Ruffini A., Periale F., Barychev V. *Laser Phys.*, **11** (10), 1110 (2001).
2. Arditi M., Carver T.R. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **13**, 146 (1964).
3. Micalizio S., Calosso C., Godone A., Levi F. *Metrologia*, **49**, 425 (2012).
4. Kang S., Gharavipour M., Afolderbach C., Gruet F., Miletì G. *J. Appl. Phys.*, **117**, 104510 (2015).
5. Micalizio S., Levi F., Godone A., Calosso C., Francois B., Boudot R., Afolderbach C., Kang S., Gharavipour M., Gruet F., Miletì G. *J. Phys. Conf. Ser.*, **723**, 012015 (2016).
6. Zanon T., Guerandel S., de Clercq E., Holleville D., Dimarcq N., Clairon A. *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 193002 (2005).
7. Hafiz M., Coget G., Yun P., Guerandel S., de Clercq E., Boudot R. *J. Appl. Phys.*, **121**, 104903 (2017).
8. Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В., Алейников М.С., Бойко А.И., Пальчиков В.Г., Блинов И.Ю. *Измерительная техника*, № 12, 33 (2016).
9. Барышев В.Н., Епихин В.М. *Квантовая электроника*, **40** (5), 431 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (5), 431 (2010)].
10. Baryshev V., Epikhin V., Blinov I., Donchenko S. *Proc. of 2016 IEEE Int. Frequency Control Symp.* (Roosevelt Hotel, New Orleans, Louisiana, USA, 2016, pp 205–208).