

РАЗРАБОТКА КВАНТОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ АТОМНЫХ ЧАСОВ

А. В. Сивак, С. А. Зибров

В Лаборатории стандартов частоты ОКРФ ФИАН ведется работа по созданию малогабаритного атомного стандарта частоты и времени. Результаты данной работы позволяют достичь ширины метрологического резонанса когерентного пленения населённостей (КПН) более узкой, чем в разрабатываемых зарубежных аналогах малогабаритных атомных часов, что напрямую влияет на стабильность стандарта. Исследованы влияние комбинации буферного газа и антирелаксационного покрытия на амплитуду и ширину резонансов КПН; изучены характеристики диодных лазеров с коротким резонатором (ДИЛКОР), специально разработанных совместно с ФГУП НИИ "Полюс". Разработан и собран прототип малогабаритного физического дискриминатора для атомных часов. Темновая ширина полученного в дискриминаторе метрологического резонанса составляет менее 1 кГц, что теоретически предполагает создание малогабаритных атомных часов со стабильностью (параметром Аллана) не хуже, чем $3 \cdot 10^{-12}$ за 1 час.

Ключевые слова: стандарты частоты, атомные часы.

В Лаборатории стандартов частоты ОКРФ ФИАН ведется работа по созданию малогабаритных атомных часов [1], которые могут найти применение в навигации, в синхронизации высокоскоростных коммуникационных сетей, в системах передачи и приёма радиочастотных сигналов с двусторонней широкополосной связью для защиты передаваемой информации, для ускорения обработки сигналов GPS или ГЛОНАСС, для повышения помехоустойчивости телекоммуникационного оборудования и во многих других

Лаборатория стандартов частоты ОКРФ ФИАН, г. Троицк Московской обл.; e-mail: sanyoker@mail.ru; szibrov@yandex.ru

областях, где сейчас используются самые прецизионные кварцевые генераторы.

Главный недостаток кварцевых генераторов – сравнительно низкая долговременная стабильность ($\sim 10^{-7} - 10^{-9}$ за сутки). Они заметно уступают по этому параметру атомным стандартам частоты и времени (10^{-11}), имеют сравнительно большие размеры ($> 50 \text{ см}^3$) и энергопотребление ($\sim 3 \text{ Вт}$).

Атомные стандарты частоты и времени, работающие по принципу двойного радиооптического резонанса в атомах щелочных металлов (чаще всего в цезии и рубидии) совершенствуются уже почти 50 лет. Уменьшение габаритов таких часов принципиально ограничено тем, что характерный размер СВЧ-резонатора, в котором находится ансамбль атомов, сопоставим с длиной волны СВЧ-поля. К примеру, длина волны для перехода между сверхтонкими подуровнями основного состояния в Cs составляет 3.2 см. Объем типичных современных стандартов частоты и времени, работающих по такому принципу, составляют не менее 300 см^3 , энергопотребление более 10 Ватт, стоимость более \$3000.

Сравнительно недавно стал активно разрабатываться альтернативный способ зондирования СВЧ-перехода в основном состоянии атомов. Он основан на использовании бихроматического лазерного поля и эффекте когерентного пленения населенностей (КПН) подуровней основного состояния атомов щелочного металла. Эффект КПН позволяет значительно сократить объём прибора, поскольку отпадает необходимость в СВЧ-резонаторе и существует возможность использовать компактные полупроводниковые лазеры как источники излучения; на порядок снизить энергопотребление, вес и стоимость. Такие разработки ведутся во многих странах (Израиль, Франция, Китай, Россия и др.) и особенно активно в США: в Национальном институте стандартов и технологии и на фирмах Agilent Technologies, Honeywell, Kernco, Symmetricom, Teledyne.

“Сердцем” стандарта частоты и времени нового типа является малогабаритный квантовый дискриминатор – в нем реализуется физический принцип работы. Дискриминатор представляет собой сборку всех необходимых оптических элементов и сопутствующих комплектующих, которые будут указаны ниже. В стандарт, кроме дискриминатора, должны входить контур обратной связи вместе со стабилизируемым СВЧ-генератором.

В США по заказу Агентства передовых оборонных исследований (DARPA) и при его финансовой поддержке разработаны лабораторные макеты атомных часов с уникальным набором характеристик: объем порядка 1 см^3 , энергопотребление – менее 30 мВт, стабильность за час порядка 10^{-11} [2]. Первые лучшие промышленные образцы мало-

габаритных атомных часов имеют объём 50 см^3 , энергопотребление от 5 Вт (фирма Symmetricom).

Несмотря на быстрый прогресс в этой области в США, разработка малогабаритных атомных часов актуальна и продолжается и в России.

Принцип работы малогабаритных атомных часов заключается в следующем. Диодный лазер настроен на частоту перехода из основного в первое возбужденное состояние атомов цезия или рубидия. При частотной модуляции тока накачки диодного лазера в спектре излучения кроме несущей частоты появляются боковые полосы. Когда интервал между ближайшими боковыми полосами становится равным частоте сверхтонкого перехода основного состояния атомов (9.192 ГГц для ^{133}Cs , 6.834 ГГц для ^{87}Rb) (рис. 2), возникает когерентная непоглощающая суперпозиция атомных состояний и пропускание среды растёт. Это эффект когерентного пленения населённостей (КПН). Зависимость пропускания ячейки с парами щелочных металлов от разности частот двух компонент излучения формирует узкий метрологический резонанс КПН (или Λ -резонанс) и используется для обратной связи и стабилизации частоты СВЧ-генератора, который и модулирует ток лазера. Далее, с помощью синтезатора, частота генератора переводится в удобный для потребителя мегагерцовый диапазон (рис. 1).

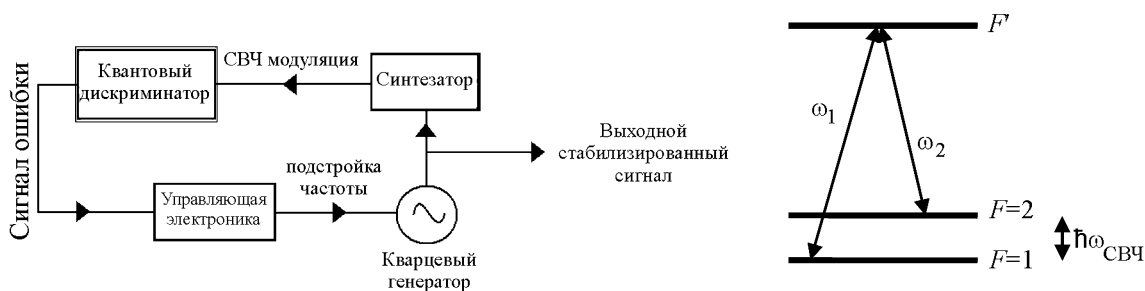


Рис. 1: Блок-схема разрабатываемого стандарта частоты.

Рис. 2: Λ -резонанс в идеальной трёхуровневой системе.

Одной из главных, отвечающих за стабильность частоты, характеристик является ширина метрологического Λ -резонанса (чем уже резонанс и меньше шумы измерения, тем стабильнее стандарт). Стабильность работы атомных часов также определяется шумами излучения, уровнем фона и шумами электронных цепей управления. Характеристики Λ -резонанса зависят от геометрии ячейки, концентрации атомного ансамбля, от способа подавления релаксации когерентности между подуровнями основного состояния атомов, определяющей ширину резонанса, и спектра оптического поля.

1. Для увеличения времени жизни атомов в когерентной непоглощающей суперпозиции в ячейку с парами атомов щелочных металлов добавляют буферный газ и/или наносят антирелаксационное покрытие на внутренние стенки ячейки. В рамках работы были исследованы характеристики Λ -резонанса в ячейках с внутренним объемом $\sim 15\text{--}1200\text{ мм}^3$, различной формы, с антирелаксационным покрытием, буферным газом и комбинацией буферного газа и покрытия, с различным соотношением давления буферных газов (Ne, Ar) и с различным общим давлением буферных газов [3]. Ячейки содержали изотоп ^{87}Rb или природную смесь изотопов ^{87}Rb (21%) и ^{85}Rb (79%).

На рис. 3 приведены сравнительные характеристики метрологического Λ -резонанса в ячейках с различным наполнением.

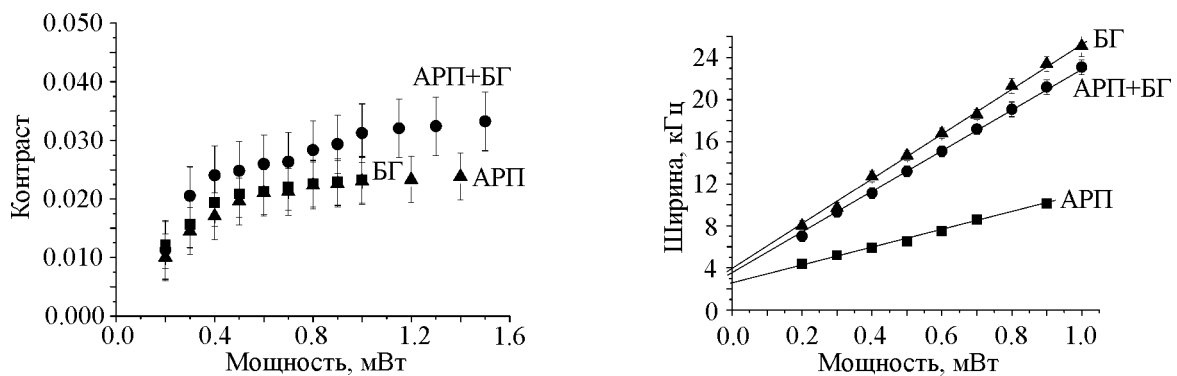


Рис. 3: Зависимость контраста и ширины от мощности падающего излучения. Круги (БГ+АРП) соответствуют ячейке с комбинацией буферного газа (5 торр Ne) и антирелаксационного покрытия, квадраты (АРП) – ячейке с антирелаксационным покрытием, треугольники (БГ) – ячейке с буферным газом (5 торр Ne).

Ожидалось, что комбинация антирелаксационного покрытия и буферного газа в большей степени уменьшит ширину резонанса КРН по сравнению со случаем использования только буферного газа, но значительного улучшения характеристик резонанса не выявлено.

Произведено сравнение двух схем возбуждения Λ -резонансов ($\text{lin}||\text{lin}$ – обе компоненты оптического поля одинаково линейно поляризованы; и $\sigma\text{-}\sigma$ – обе компоненты одинаково циркулярно поляризованы) в малых ячейках с рубидием при относительно небольшой интенсивности. $\text{lin}||\text{lin}$ схема позволяет получать при повышенной мощности излучения лазера (до 5 мВт) Λ -резонансы более высокого контраста (до 10%), по сравнению с $\sigma\text{-}\sigma$ схемой ($\sim 2\%$), при сохранении ширины резонанса.

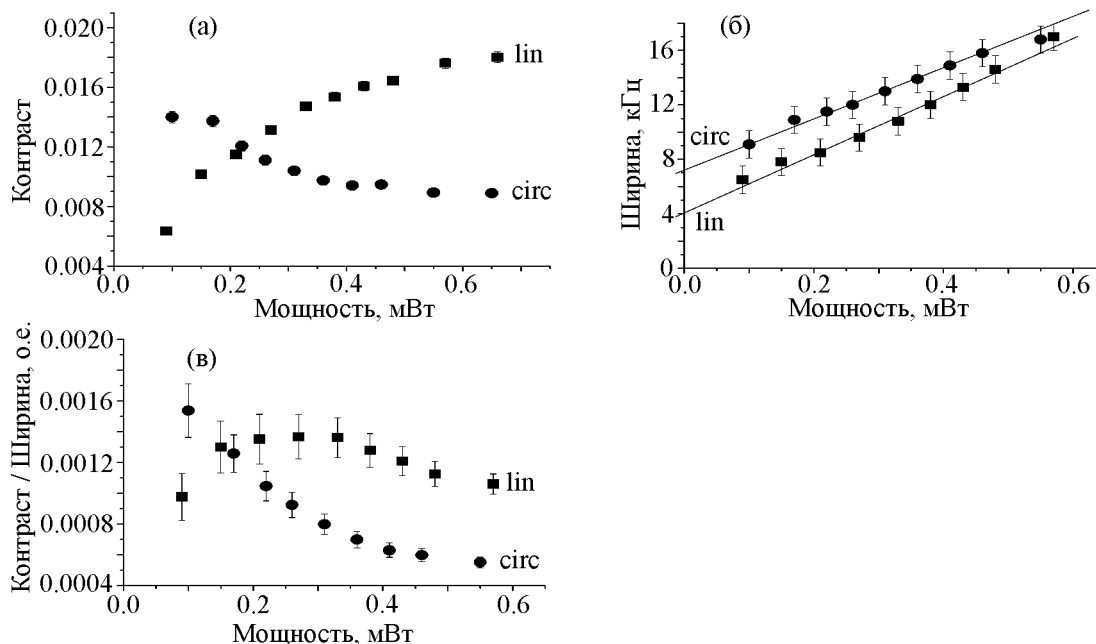


Рис. 4: Зависимость контраста (а), ширины (б) и отношения контраста к ширине (в) от мощности излучения, падающего на ячейку. Ячейка с рубидием в виде диска диаметром 10 мм и толщиной 3 мм, буферным газом Ne 5 торр. Квадраты (lin) соответствуют измерениям в lin||lin схеме, круги (circ) – σ - σ схеме.

По результатам работ принято решение использовать сферическую ячейку диаметром 3 мм с щелочным металлом цезием (^{133}Cs) со смесью буферных газов (аргон и неон в определенной пропорции для компенсации температурного сдвига частоты метрологического резонанса). Такая ячейка перспективна для создания прототипа квантового дискриминатора для малогабаритных атомных часов в случае использования специально разработанных компактных диодных лазеров с коротким резонатором (ДИЛКОР) отечественного производства на D_1 линию цезия (895.4 нм). Ширина Λ -резонанса в ячейке с суммарным давлением буферных газов 20 торр составляет менее 2 кГц при контрасте 2% (рис. 4, 5).

В случае использования рубидия и лазеров с вертикальным резонатором, излучающих с поверхности (VCSEL) с длиной волны излучения на D_1 линию рубидия (795 нм), которые в России пока не производятся, перспективна lin||lin схема, однако она не работает в ячейках с большим давлением буферного газа (более 15 торр) из-за столкновительного уширения подуровней возбужденного состояния рубидия на величину их расщепления, что разрушает когерентность переходов в Λ -схеме. Поэтому оптимальные

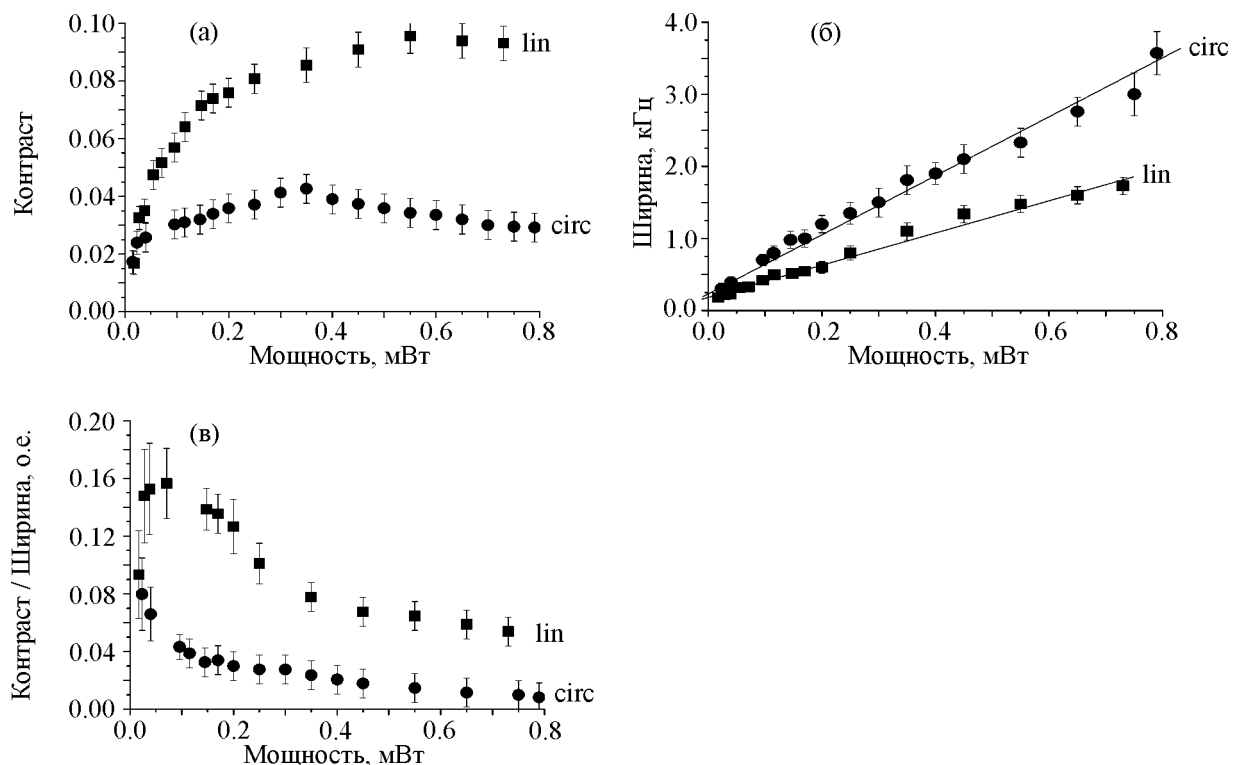


Рис. 5: Зависимость контраста (а), ширины (б) и отношения контраст/ширина (в) от мощности излучения, падающего на рубидиевую ячейку (диаметром 13 мм) с покрытием. Температура 62°C . Диаметр пучка равен размеру ячейки. Квадраты (*lin*) соответствуют измерениям в *lin||lin* схеме, круги (*circ*) – σ - σ схеме.

параметры ячейки с изотопом ^{87}Rb : цилиндрическая геометрия, с характерным диаметром 3 мм и длиной 4–5 мм; давление смеси буферных газов аргона и неона 10–15 торр и парциальными давлениями соответственно 2/1.

2. Только диодные лазеры способны обеспечить требуемые компактность и малое энергопотребление. При этом динамические характеристики лазера должны обеспечивать высокую эффективность СВЧ-модуляции без возбуждения лишних мод. В экспериментах использовались специально разработанные совместно с ФГУП НИИ “Полюс” диодные лазеры с коротким резонатором порядка 100 мкм (ДИЛКОР) (длина волны излучения 894–897 нм) [4], а также лазеры, излучающие с поверхности (VCSEL). В отличие от лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL), где перестроечная характеристика не имеет разрывов, для ДИЛКОР это явление (рис. 6) не позволяет всем образцам с равной вероятностью настраиваться на D_1 линию поглощения цезия (894.7 нм) и таким

образом, исключает возможность использования некоторых образцов для целей создания стандарта частоты на основе Λ -резонанса. Полезный выход из 40 изготовленных образцов составил $\sim 30\%$.

Диапазон значений порогового тока составляет 4.6–5.3 мА, рабочий ток до 10 мА, мощность излучения до 2 мВт. Усреднённые коэффициенты, описывающие перестроечные характеристики:

- скорость перестройки моды по току: $(K_m^I)_{av} = 0.02$ нм/мА; (9 ГГц/мА);
- скорость перестройки моды по температуре: $(K_m)_{av} = 0.07$ нм/°С; (27 ГГц/°С);
- скорость перестройки огибающей спектра: $(K_s)_{av} = 0.3$ нм/°С; (110 ГГц/°С).

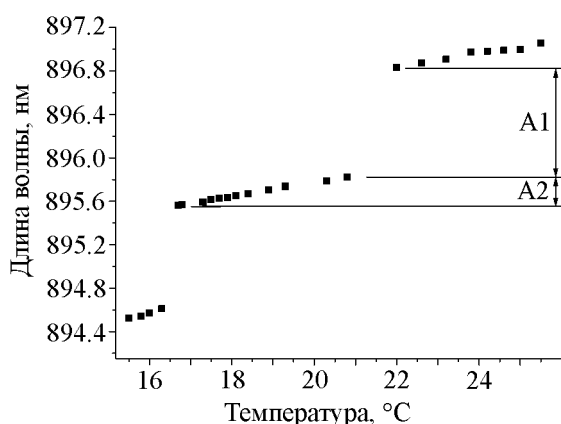


Рис. 6: Температурная перестроечная характеристика одного из образцов ДИЛКОР при максимальном рабочем токе накачки 10 мА.

Особенностью большинства образцов ДИЛКОР был чрезмерный фазовый шум, который приводит к амплитудному шуму на экстремуме линии поглощения – там же, где и наблюдается Λ -резонанс. Из-за этого шума (достигающего иногда для некоторых лазеров до 5% амплитуды фонового сигнала пропускания на центре линии поглощения) отношение сигнала к шуму при регистрации Λ -резонанса (контраст резонанса до 3%) может быть менее единицы, следовательно, для использования таких лазеров в стандарте частоты необходимо дополнительно изучить эти шумы и причины их возникновения.

Из ДИЛКОР, попадающих в линию поглощения цезия, не выявлено работающих в строго одночастотном режиме. У лучших образцов доля мощности излучения, сосредоточенная в рабочей моде, составляет 91%.

Перспективными лазерами как с точки зрения устойчивости режимов генерации в режиме СВЧ-модуляции, шумовых характеристик, так и возможностью получения исключительного одномодового режима генерации, являются VCSEL (характерная длина резонатора порядка десяти микрон). Пороговый ток таких лазеров около 0.5 мА, мощность при максимальном рабочем токе 2 мА около 450 мкВт. В использованных VCSEL отсутствует чрезмерный фазовый шум, какой возникал у ДИЛКОР, и отношение сигнала к шуму при регистрации Λ -резонанса превышает 5.

3. К настоящему времени разработаны и собраны прототипы малогабаритных квантовых дискриминаторов: с ячейкой с ^{133}Cs и давлением буферных газов 20 торр и ДИЛКОР [5], а также с ячейкой с ^{87}Rb и давлением смеси буферных газов 170 торр и VCSEL. Дискриминатор представляет собой сборку элементов в цилиндрическом корпусе размером, не превышающим размер батарейки формата АА. Диодный лазер с СВЧ-разъёмом и элементом Пельтье, коллимирующий объектив, соленоид (соленоид создает магнитное поле, направленное вдоль распространения лазерного луча, которое приводит к расщеплению зеемановских подуровней и даёт возможность наблюдать Λ -резонанс между определёнными подуровнями, не зависящий от магнитного поля в линейном приближении), сферическая ячейка диаметром 3 мм, нейтральный фильтр, пластинка $\lambda/4$, теплоизолятор, нагревательный элемент для нагрева сферической ячейки, термодатчики, фотодиод, многослойный магнитный экран (для изоляции ячейки от внешнего магнитного поля), размещены в цилиндрическом корпусе длиной около 4 см, диаметр около 13 мм. Объём 5 см³. Ширина (менее 2 кГц) и контраст (2% в σ - σ схеме) полученных в дискриминаторах метрологических Λ -резонансов предполагают создание атомных часов со стабильностью (параметром Аллана) не хуже, чем $3 \cdot 10^{-12}$ при времени интегрирования 1 час в приближении учета только дробового шума излучения лазера. В настоящее время командой проекта ведётся дальнейшая модернизация и миниатюризация прототипа дискриминатора, а также проектирование электронной системы стабилизации часов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. В. Васильев, Я. О. Дудин, С. А. Зибров и др., “Эффект когерентного пленения населенностей и его применения в метрологии” в: *Научная сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов* (МИФИ, Москва, 2008), с. 48.
- [2] J. F. DeNatale, R. L. Borwick, C. Tsai, et al., “Compact, Low-Power Chip-Scale Atomic Clock” in: *Proc. IEEE ION/PLANS 2008* (Monterey, CA USA, 2008).

- [3] О. Н. Козлова, С. А. Зибров, В. Л. Величанский, “Резонансные ячейки с парами атомов ^{87}Rb для малогабаритных атомных часов” в: *Научная сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов* (МИФИ, Москва, 2008), с. 212.
- [4] С. В. Каргапольцев, В. Л. Величанский, В. В. Васильев и др., *Квантовая электроника* **39**(6), 487 (2009).
- [5] А. В. Сивак, В. Л. Величанский, В. В. Васильев, С. А. Зибров, “Разработка малогабаритного квантового дискриминатора для атомных часов” в: *Сборник трудов III Международной научно-практической конференции “Информационные технологии в образовании, науке и производстве”* (Серпухов, 2009 г.; Комитет по образованию, г. Серпухов, 2009), часть 2, секция 5, с. 191.

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 24 апреля 2011 г.