

07;12

Применение электронно-оптического преобразователя механических колебаний с использованием голографического оптического элемента в сейсмометрии

© В.К. Жуковский,¹ Е.В. Карягин,² А.Ю. Попов³

¹ Южно-Украинский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, 65020 Одесса, Украина
e-mail: s.wadim@rambler.ru

² Главный центр специального контроля Национального центра управления и испытаний космических средств Национального космического агентства Украины, Макаров, Киевская область, Украина
e-mail: eugenix@ukr.net

³ Научно-исследовательский институт физики Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, 65020 Одесса, Украина

(Поступило в Редакцию 9 февраля 2009 г. В окончательной редакции 18 августа 2009 г.)

Рассматривается возможность применения электронно-оптической системы преобразования механических колебаний в электрические на основе голографических оптических элементов в задачах сейсмометрии. Отличительной особенностью способа является высокая чувствительность и простота реализации. На базе предлагаемого способа регистрации сейсмических колебаний может быть создан оригинальный тип новых приборов, а также проведена эффективная модернизация уже эксплуатируемых моделей сейсмоприемников. При этом предполагается возможность совместной работы электронно-оптического преобразователя со штатным устройством.

Введение

История сейсмометрии насчитывает тысячелетия. Об этом свидетельствует дрейний китайский сейсмоскоп, созданный еще в 123 г. нашей эры и представляющий собой сочетание произведения искусства и инженерной техники. Он выполнен в виде кувшина с сориентированными по сторонам света стилистическими пастями драконов, в которые вложены металлические шарики. Под действием землетрясения шарики падают в соответствующие открытые пасти таких же искусно сделанных лягушек в зависимости от направления распространения сейсмических волн.

С годами техника сейсмических наблюдений совершенствовалась, но переворот в сейсмометрии произвел блестящий ученый в области оптики и математики Б.Б. Голицын [1]. Он изобрел способ гальванометрической записи землетрясений. Впервые в 1902 г. им была разработана теория сейсмографа, а позже создан сам сейсмограф и организованы первые сейсмические станции. На этих станциях были установлены сейсмоприемники нового типа. Многие сейсмические службы используют сейсмоприемники, сделанные по схеме Голицына, и по сей день.

Настоящая работа посвящена приложению последних достижений прикладной оптики в создании высокочувствительной сейсмической измерительной аппаратуры.

Теоретический анализ

Принципы работы любого сейсмоприемника одинаковы [2–4]. Главным элементом устройства любого сейсмо-

приемника является груз-маятник, имеющий некий подвес к основанию прибора. В идеале маятник не должен иметь каких-либо механических или электромагнитных связей с корпусом. Однако это пока нереализуемо в условиях притяжения Земли. Корпус сейсмоприемника жестко контактирует с почвой и поэтому приходит в движение при землетрясении, причем в силу свойства инерции груз-маятник должен оставаться неподвижным. Для получения записи сейсмических колебаний (сейсмограммы) в простейшем случае служит вращающийся с постоянной скоростью барабан самописца с бумажной лентой, который приклеплен к корпусу сейсмоприемника, и перо, связанное с маятником.

Для сейсмоприемников чаще всего применяют маятники, центр качаний которых сохраняет относительный покой или охватывает от движения колеблющейся земной поверхности и связанной с ней осью подвеса. Степень покоя центра качаний сейсмоприемника характеризует его работу и определяется отношением периода T_p колебаний почвы к периоду T_0 собственных колебаний маятника сейсмоприемника. Если $T_p/T_0 \ll 1$, то центр качаний практически неподвижен и колебания почвы воспроизводятся без искажений. При T_p/T_0 , близком к единице, возможны искажения из-за резонанса. При значениях $T_p/T_0 \gg 1$, когда движения почвы очень медленны, свойства инерции не проявляются, центр качаний движется практически как единое целое с почвой и сейсмоприемник перестает фиксировать колебания почвы.

Все преимущества и недостатки сейсмоприемников вытекают из уравнения движения их механических ча-

стей [1]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + n_0^2x = -V \frac{d^2\xi}{dt^2}, \quad (1)$$

где x — отклонение от положения равновесия на сейсмограмме, ξ — смещение почвы, ε — постоянная затухания, $n_0 = \frac{2\pi}{T_0}$, T_0 — период собственных колебаний маятника, V — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей сейсмоприемника, носит название нормального усиления.

Если колебания почвы происходят по гармоническому закону, т.е. $\xi = \xi_0 \cos \omega t$, то решение уравнения (1) имеет вид:

$$x = \bar{x} + x_0(\omega) \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где \bar{x} — характеризует собственные колебания маятника сейсмоприемника, x_0 — амплитуда колебаний на регистрирующем устройстве. В настоящей работе не будем останавливаться на параметре \bar{x} . Только отметим, что в устройстве механической части сейсмоприемника используется жидкостный амортизатор для гашения собственных колебаний [2,4]. В этом случае параметром \bar{x} в уравнении (2) можно пренебречь. Из уравнения (2) видно, что чувствительность сейсмоприемника является функцией частоты приходящих колебаний и между его движениями и движениями почвы присутствует фазовая задержка. $x_0(\omega)$ выражается соотношением:

$$x_0 = \xi_0 \frac{\omega^2 V}{\sqrt{(n_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}}. \quad (3)$$

При установившемся колебании фазовый сдвиг φ равен:

$$\varphi = \arctg \frac{-2\varepsilon \omega}{n_0^2 - \omega^2}. \quad (4)$$

Кривая x_0/ξ_0 , построенная как функция ω , называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) сейсмоприемника, так как характеризует его чувствительность к определенной частоте. Отметим, что на сегодняшний день есть много оригинальных конструктивных решений в механической части сейсмоприемников, позволяющих расширить диапазон измеряемых сейсмических колебаний практически от 0 до 1 kHz [5,6].

Обратим внимание на параметр V в уравнениях (1) и (3). Сейсмоприемник помимо механической части (конструкции маятника и корпуса, системы подвесов и подавителей собственных колебаний маятника и др.) содержит и систему преобразования механических колебаний почвы регистрирующего элемента. В этом случае нужно иметь в виду, что коэффициент нормального усиления тоже будет функцией частоты. Сейсмоприемники Голицына работают в узком диапазоне частот вследствие того, что ЭДС используемой катушки будет существенно зависеть от частоты колебаний. Низкочастотные колебания, вызываемые лунно-солнечными приливами, такие системы принципиально не способны регистрировать.

Во второй половине XX в. наступила эра электронных сейсмоприемников. На маятники таких сейсмоприемников помещаются параметрические преобразователи [5,6]. В качестве переменного параметра служат: емкость воздушного конденсатора, индуктивное сопротивление высокочастотного трансформатора, сопротивление фоторезистора, проводимость фотодиода под лучом светодиода, пьезоэффект и др. Основное их достоинство в том, что линейный участок АЧХ коэффициента нормального увеличения V находится в гораздо более широком диапазоне частот, чем ЭДС электромагнитной катушки. Это, в свою очередь является основой для создания сейсмоприемников, способных работать в широком диапазоне частот практически от 0 до 1 kHz и более. Но здесь нужно сделать оговорку о том, что в области низких частот, вызванных, например, лунно-солнечными приливами, имеют место не инертные свойства маятника, а изменение гравитационных сил, которые будут изменять его вес и, как следствие, вызовут низкочастотные колебания относительно корпуса. Именно эти низкочастотные колебания могут быть выявлены электронными сейсмоприемниками. В противном случае, согласно уравнению (3), при $\omega \rightarrow 0$ также будет $x_0 \rightarrow 0$.

Из практики тензометрических измерений [7] хорошо известно, что интерферометрические методы являются наиболее чувствительными к микроперемещениям. По чувствительности они на 2–3 порядка превосходят емкостные и пьезоэлектрические датчики. Целью настоящей работы является создание высокочувствительного сейсмоприемника с использованием методов оптической интерферометрии для регистрации микроколебаний поверхности Земли.

Рассмотрим модель, в которой интерферометр Майкельсона размещен на маятнике, а зеркало одного из его плеч закреплено на корпусе сейсмоприемника. Интенсивность результирующего луча I будем регистрировать фотоэлементом. В этом случае регистрируемая интенсивность (сигнал интерферометра) будет зависеть от расстояния между маятником и корпусом l :

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l + \varphi_0\right), \quad (5)$$

где I_1, I_2 — интенсивность интерферирующих лучей; γ — степень когерентности источника света; λ — длина волны света; φ_0 — начальная фаза.

Рассмотрим сигнал интерферометра, который возникает в результате отражения света от вибрирующей поверхности зеркала, закрепленного на корпусе. В результате его колебания разность фаз интерферирующих лучей изменяется следующим образом:

$$\Delta\Psi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} l_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

где φ — фазовая задержка, определяемая уравнением (4), а l_0 — амплитуда колебаний закрепленного на корпусе зеркала. Согласно уравнению (3), $l_0 = x_0/V$.

Исходя из всех вышеприведенных уравнений можно записать уравнение оптического сейсмоприемника с преобразователем, работающим по интерферометрическим принципам:

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1 I_2} \times \cos\left(\frac{4\pi\xi_0\omega^2 \sin(\omega t - \arctg \frac{-2\varepsilon\omega}{n_0^2 - \omega^2})}{\lambda\sqrt{(n_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega^2}} + \varphi_0\right). \quad (7)$$

В уравнении (7) можно выделить два особых случая, когда амплитуда колебаний меньше половины длины волны используемого излучения света $\xi_0 < \lambda/2$ и когда $\xi_0 > \lambda/2$. Смоделированная форма сигналов в этих случаях изображена на рис. 1.

При $\xi_0 < \lambda/2$ интенсивность освещения фотоприемника пропорциональна смещению поверхности почвы. В этом случае оптический сейсмоприемник будет регистрировать колебания в привычной форме (рис. 1, а), т.е. будет получена типичная сейсмограмма. Волновые формы сейсмического сигнала будут записаны без искажений. Если $\xi_0 > \lambda/2$, то сигнал будет иметь несколько необычную форму (рис. 1, б) при регистрации сейсмических колебаний. Однако такое представление сигнала можно считать преимуществом, не смотря на то что теряется реальная волновая картина. В этом случае $\xi_0 \approx n\lambda/2$, n — число пиков между своеобразными перемычками, которые возникают в тот момент, когда колебания почвы достигают своих предельных значений. Например, на рис. 1 $n = 4$. Такое представление сигнала, во-первых, предохраняет систему от зашкаливания по амплитуде, что значительно расширяет динамический

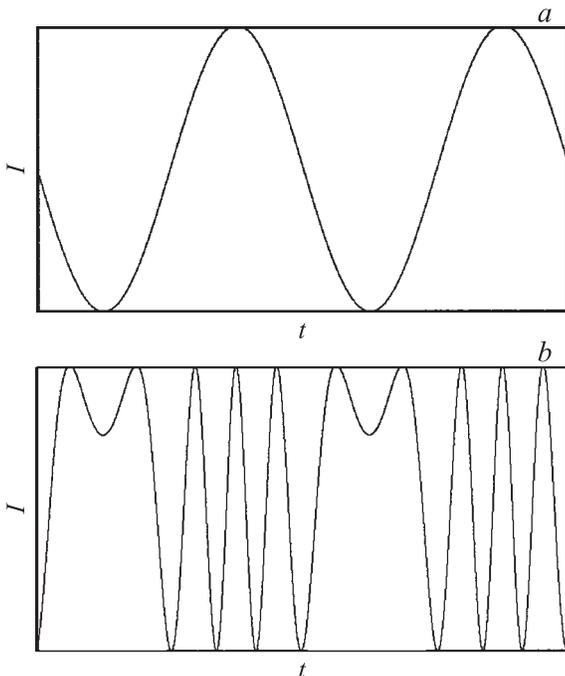


Рис. 1. Модель сигналов оптического сейсмоприемника при а) $\xi_0 < \lambda/2$; б) $\xi_0 > \lambda/2$.

диапазон измерений, а во-вторых, позволяет вполне быстро и точно определить значение амплитуды сейсмических колебаний большой интенсивности. Стоит отметить, что теоретически диапазон регистрируемых амплитуд колебаний поверхности Земли может варьироваться от ангстрем до нескольких сантиметров. Данный параметр будет зависеть от качественных характеристик фотоприемника и усилителя.

Методика проведения эксперимента

Под последними достижениями прикладной оптики, о которых было сказано во вступительной части, подразумевается то, что в качестве делителя пучка в электронно-оптическом преобразователе колебаний используется не полупрозрачное зеркало, как в интерферометре Майкельсона, а голографический оптический элемент (ГОЭ) [8,9]. Применение объемной дифракционной решетки, которая и является ГОЭ, для разделения пучка в интерферометре позволяет получить более контрастную интерференционную картину.

Для создания подобных сейсмоприемников наиболее предпочтительно использование лазерных диодов. В излучении лазерного диода обычно присутствуют несколько мод, за счет чего спектр его излучения уширен по сравнению со специализированными одномодовыми лазерами. Как известно, длина когерентности L связана с шириной спектра $\Delta\lambda$ соотношением: $L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$. Из уравнения Брэгга $2d \sin \Omega = n\lambda$, которое справедливо для объемных дифракционных решеток, следует, что из спектра излучения лазерного диода вырезается очень узкая его часть. Таким образом, при использовании ГОЭ в качестве делителя пучка реализуется своего рода фильтр, который значительно улучшает когерентные свойства интерферирующих лучей γ и, согласно уравнению (5), повышается контраст результата интерференции. Если говорить о сейсмоприемнике, то повышается соотношение сигнал/шум. Такое конструктивное решение также позволяет упростить процесс юстировки оптической части сейсмоприемника.

Подобного рода сейсмоприемники чрезвычайно чувствительны к микроколебаниям. При использовании малошумящего фотоприемника и усилителя электронного сигнала измеряемые амплитуды могут быть порядка 1 А.

На материальной базе украинской антарктической станции „Академик Вернадский“ были изготовлены и испытаны 4 высокочувствительных оптических сейсмоприемника, в которых реализованы все вышеизложенные идеи. На основе этих приборов создана малоапертурная сейсмическая группа для локации слабоинтенсивных сейсмических источников. Антарктические условия, в которых практически отсутствует антропогенный фактор, являются благоприятными для проведения такого рода исследований.

На рис. 2 изображен интерферометр с ГОЭ, который крепится на маятнике сейсмоприемника (рис. 3), а зеркало 5 одного из его плеч с юстировочным механизмом

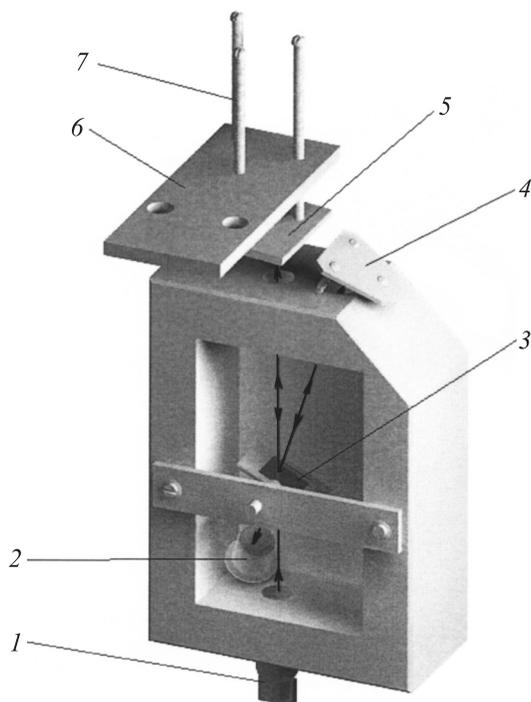


Рис. 2. Интерферометр с голографическим оптическим элементом: 1 — полупроводниковый лазер, 2 — фотодиод, 3 — ГОЭ, 4 — зеркало опорного луча с юстировочными винтами, 5 — зеркало сигнального луча, 6 — пластина крепления зеркала к корпусу, 7 — юстировочные винты.

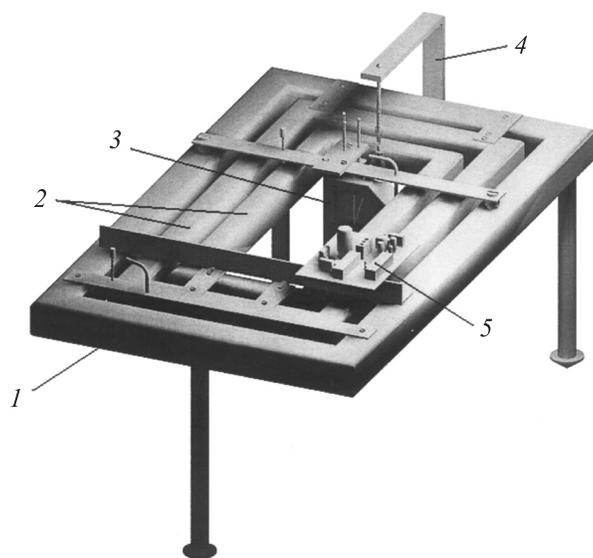


Рис. 3. Сейсмоприемник: 1 — корпус, 2 — рамки маятника, 3 — интерферометр с ГОЭ, 4 — подвес пружины маятника, 5 — электронный усилитель сигнала.

при помощи пластины 6 (рис. 2) крепится к корпусу. Такое расположение элементов конструкции является оптимальным для операции юстировки интерферометра.

На рис. 3 изображен сейсмоприемник, в котором маятник выполнен в виде двух рамок, вложенных друг

в друга. Такая конструкция, во-первых, обеспечивает вертикальные смещения вдоль плеча интерферометра, а во-вторых, из-за разного периода колебаний рамок выше коэффициент затухания маятника.

Сигнал фотодиода усиливается операционным усилителем 741 серии. Схема, собранная на его базе, имеет линейную АЧХ в диапазоне от практического 0 до 500 Hz. Сейсмоприемник подключался ко встроенному в компьютер АЦП кабелем длиной 700 метров. В виду того что эксперимент проводился в Антарктиде, где соблюдается относительная чистота эфира и интенсивность электронных помех искусственного происхождения мала, то в данной конструкции не было необходимости в использовании электронных фильтров. Фильтрация записанных волновых форм осуществлялась программным способом на компьютере.

Обсуждение результатов

Сигналы, полученные предлагаемым оптическим сейсмоприемником, сравнивались с сигналами, полученными сейсмоприемником GURALP. Проводя анализ волновых форм на рис. 4 и 5, полученных от одного и того же события, можно отметить, что оптический сейсмоприемник обладает лучшим соотношением сигнал/шум (фон) в диапазоне выше 5 Hz. Это, в свою очередь, повышает вероятность правильного обнаружения сигналов малой интенсивности. Различия в огибающих волновых форм объясняются различием в конструктивных особенностях механических частей сейсмоприемников, разными периодами собственных колебаний и коэффициентами затуханий. При создании механической части оптического сейсмоприемника основное внимание уделялось решению задачи по регистрации ближних событий, для которых характерна частота от 4 до 15 Hz. Такой диапазон

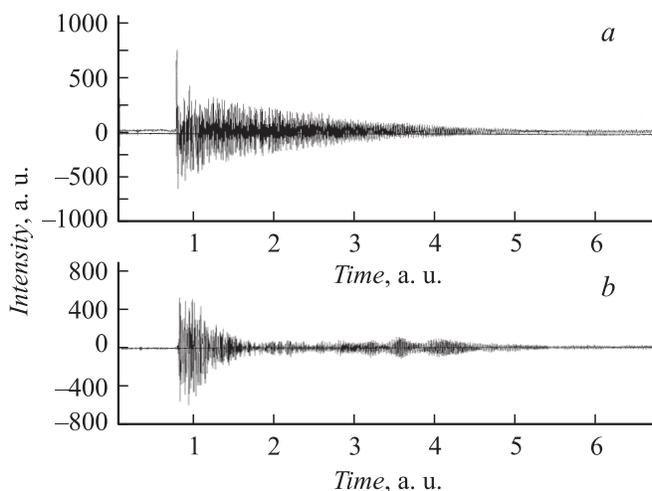


Рис. 4. Сейсмограмма крушения передней кромки ледника, зарегистрированная оптическим сейсмоприемником 08 сентября 2008 г. в районе Аргентинских островов (Западная Антарктика): *a*) не фильтрованный сигнал, *b*) фильтрованный сигнал в диапазоне 2–6 Hz.

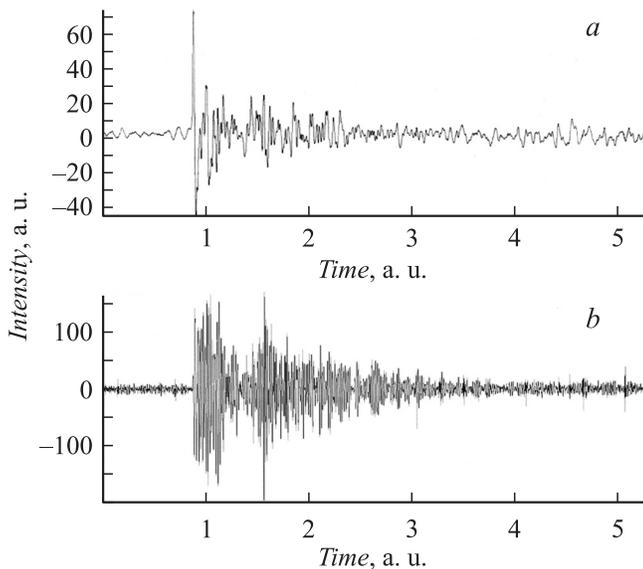


Рис. 5. Сейсмограмма крушения передней кромки ледника, зарегистрированная сейсмоприемником GURALP 08 сентября 2008 г. в районе Аргентинских островов (Западная Антарктика): *a*) не фильтрованный сигнал, *b*) фильтрованный сигнал в диапазоне 2–6 Hz.

частот характерен для сейсмоприемников, используемых в сейсмопрофилировании.

В рамках настоящей работы проводился эксперимент по модернизации широкополосного сейсмоприемника типа ДСВ. Для этого на данном сейсмоприемнике был дополнительно установлен электронно-оптический преобразователь механических колебаний в электрические (рис. 2). В результате была получена возможность высокочувствительной регистрации в области частот ниже 1 Hz.

Выводы

В рамках исследования возможности применения интерферометрических методов для регистрации сейсмических колебаний сделано следующее.

1. Получено уравнение сейсмоприемника, в котором в качестве регистрирующего элемента используется электронно-оптический преобразователь, работающий по принципу интерферометра.

2. Проведено компьютерное моделирование работы оптического сейсмоприемника, на основе которого показана целесообразность практического применения приборов данного типа.

3. Создана действующая модель сейсмоприемника с применением электронно-оптического преобразователя на основе интерферометра с голографическим оптическим элементом.

4. Проведен сравнительный анализ сейсмограмм, полученных оптическим сейсмоприемником и штатным станционным сейсмоприемником GURALP. Отмечено, что высокие характеристики по чувствительности и

отношению сигнал/шум возможно получить более простым способом, чем в современных широко применяемых и дорогих приборах.

5. Получен успешный опыт по модернизации других моделей сейсмоприемников установкой электронно-оптической приставки.

Список литературы

- [1] Гутенберг Б. Основы сейсмологии. М.; Л., 1935.
- [2] Рыков А.В. // Сейсмические приборы. М.: Наука, 1979. Вып. 12.
- [3] Wieland E., Streckeisen G. // Bull. Seismol. Soc. Am. 1982. Vol. 72. P. 2349–2367.
- [4] Аппаратура для регистрации сейсмических процессов / Под ред. Е.С. Борисевича. М.: Наука, 1976.
- [5] Рыков А.В., Башилов И.П. // Сейсмические приборы. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1997. Вып. 27.
- [6] Wieland E., Stein J.M. // Ann. Geophys. Ser. B. 1986. Vol. 4. N 3. P. 227–232.
- [7] Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Под общ. ред. Г.С. Варданян. М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 1995. 568 с.
- [8] Белоус В.М., Мандель В.Е., Попов А.Ю., Тюрин А.В. // Опт. и спектр. 1999. Т. 87. № 2. С. 327–332.
- [9] Popov A. Yu., Belous W.M., Churashev V.P., Manchenko L.I., Mandel V.E., Shugailo Yu.B., Tyurin A.V. // SPIE Proc. N 3904. 1999. P. 624.