

УДК 621.375.826;621.3.038.

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

В.П. Андросов, С.В. Базаров, А.М. Гвоздь, А.В. Черкашин

ННЦ ХФТИ, НИК УЯС, 1, ул. Академическая, Харьков, 61000, Украина

Поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

В работе в приближении плоской волны исследованы энергетические характеристики резонаторов Фабри-Перо и кольцевого 4-х зеркального. Получены достаточно простые соотношения, описывающие их свойства. Сравнение показало, что резонатор Фабри-Перо имеет некоторые преимущества. Кольцевой 4-х зеркальный резонатор с двумя сферическими и с двумя плоскими зеркалами, с высокими коэффициентами отражения и пропускания, целесообразно использовать в случаях, когда в резонаторе Фабри-Перо начинают проявляться дифракционные потери.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Фабри-Перо, оптические резонаторы, накопление, добротность.

В роботі в наближенні плоскої хвилі були досліджені енергетичні характеристики резонаторів Фабрі-Перо і кільцевого 4-х дзеркального. Отримані досить прості співвідношення, що описують їх властивості. Порівняння показало, що резонатор Фабрі-Перо має деякі переваги. Кільцевий 4-х дзеркальний резонатор з двома сферичними і двома плоскими дзеркалами, з високими коефіцієнтами відбиття і пропускання, доцільно використовувати у випадках, коли в резонаторі Фабрі-Перо починають проявлятися дифракційні втрати.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Фабрі-Перо, оптичні резонатори, накопичення, добротність.

In this paper were investigated the energy characteristics of the Fabry-Perot cavity and four-mirror ring cavity, in the approximation of plane wave. Fairly simple relations describing their properties were obtained. The comparison showed that the Fabry-Perot cavity has some advantages. The four mirror ring cavity with two flat and two concave mirrors is suitable for use in cases where the Fabry-Perot diffraction losses begin to appear.

KEY WORDS: Fabry-Perot, optical cavity, storage, Q-factor.

ВВЕДЕНИЕ

Получение мощных коротких импульсов, следующих с частотой в десятки и сотни мегагерц, является в настоящее время достаточно серьезной задачей [1-3]. Такая проблема стоит и в ННЦ ХФТИ перед разработчиками лазерно-оптической системы для генератора квази-монохроматического рентгеновского излучения «НЕСТОР» на основе обратного комптоновского рассеяния [4-5]. Одним из подходов её решения в данное время является близкое к когерентному сложение лазерных импульсов в оптическом резонаторе, имеющем сильную «перетяжку» своего резонансного волнового пучка [1,4]. Для этих целей, как правило, используются резонаторы Фабри-Перо с геометрией близкой к концентрическому резонатору и кольцевые 4х-зеркальные резонаторы, образованные двумя сферическими и двумя плоскими зеркалами. «Перетяжка» резонансного волнового пучка в них образуется в фокусе обоих сферических отражателей. Вид этих двух типов резонаторов представлен на рис. 1. Целью данной работы является выяснение преимуществ каждого из них.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Расчет энергетических характеристик резонаторов, приведенных на рис.1, проведем в приближении плоской волны, когда пренебрегается кривизной волнового фронта резонансных пучков. Такой подход в этой работе в значительной мере оправдан, так как последняя оказывает влияние, главным образом, на фазовые характеристики оптических резонаторов. Нас же, в первую очередь, интересует величина усиления этими резонаторами интенсивности входного пучка, а также их добротность и полоса пропускания. Знание последних является очень важным для разработки системы автоподстройки частоты лазера, без которой нельзя будет реализовать эффективное сложение его импульсов в резонаторе.

Расчет проведем для кольцевого 4х-зеркального резонатора. Характеристики резонатора Фабри-Перо получим, сделав в найденных соотношениях замену реальных коэффициентов отражения и прохождения для двух зеркал на идеальные, например, для третьего и четвертого отражателей, $r_3 = r_4 = -1$; $t_3 = t_4 = 0$.

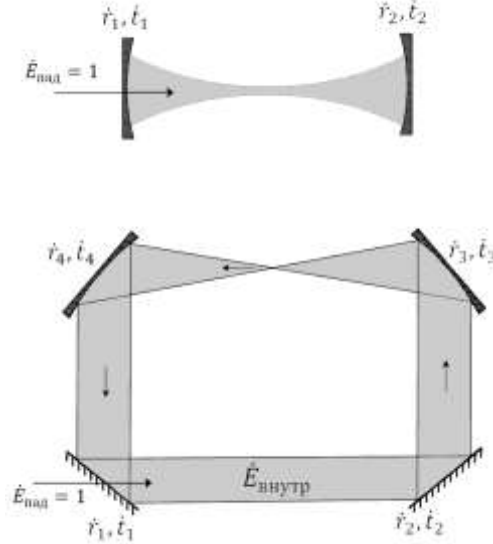


Рис. 1. Схематический вид резонаторов: Фабри-Перо, 4-х зеркальный кольцевой.
 $\hat{r}_i = r_i \exp(i\varphi_{r_i})$ и $\hat{t}_i = t_i \exp(i\varphi_{t_i})$

Под падающей волной будем рассматривать волну единичной амплитуды $\dot{E}_{пад} = 1$ (рис. 1). Волну, отходящую от входного (первого) зеркала внутрь резонатора, обозначим как $\dot{E}_{внутр}$. В установившемся режиме эта волна, претерпевая отражения от всех 4-х зеркал и увеличивая фазовый набег при своем распространении, после отражения от первого зеркала, суммируется с частью падающей волны, прошедшей через него, и переходит сама в себя. Это может быть записано в виде:

$$\dot{E}_{внутр} e^{-ikl_1} \hat{r}_2 e^{-ikl_2} \hat{r}_3 e^{-ikl_3} \hat{r}_4 e^{-ikl_4} \hat{r}_1 + \hat{t}_1 = \dot{E}_{внутр} \quad (1)$$

Таким образом, амплитуду волны внутри резонансной структуры можно достаточно просто найти с помощью следующего соотношения:

$$\dot{E}_{внутр} = \frac{\hat{t}_1}{1 - \prod_{i=1}^4 \hat{r}_i e^{-ikL}} \quad ; \quad (2)$$

где $\prod_{i=1}^4 \hat{r}_i = \hat{r}_1 \hat{r}_2 \hat{r}_3 \hat{r}_4$;

$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ – длина кольцевого резонатора.

Преобразуем соотношение (2) к виду, удобному для физической интерпретации. Опустив промежуточные преобразования, запишем:

$$\dot{E}_{внутр} = \frac{\hat{t}_1}{1 - \prod_{i=1}^4 \hat{r}_i e^{-2\pi i \Delta\omega / \omega_M}} \quad , \quad (3)$$

где $\omega_M = 2\pi c/L$ – межмодовая частота (представляет собой частотный интервал между соседними типами колебаний, имеющими одинаковое поперечное распределение поля $\omega_M = |\omega_{q\pm 1} - \omega_q|$), L – длина резонатора Фабри-Перо, c – скорость света.

$\Delta\omega = \omega - \omega_q$; ω_q – собственная q -тая частота кольцевого резонатора.

Её можно найти из соотношения (2) с учетом, что в момент резонанса поле внутри резонатора достигает своего максимального значения.

$$\left| \dot{E}_{внутр} \right| = E_{внутр}^{\max} \quad ;$$

Это дает следующее соотношение для определения собственной частоты ω_q (без учета влияния кривизны волнового фронта внутри резонатора).

$$\omega_q = \omega_M \left(q + 2 + \frac{\sum_{i=1}^4 \varphi r_i}{2\pi} \right); \quad (4)$$

Выделим в соотношении (3) амплитуду и фазу. Опустив промежуточные выкладки, запишем:

$$\dot{E}_{\text{вытп}} = \frac{t_1 e^{-i \arctg(\Delta\omega/\omega_{1/2})}}{1 - \prod_{i=1}^4 r_i \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{1/2}} \right)^2}}; \quad (5)$$

где $\Delta\omega_{1/2}$ – полуширина резонансной кривой на полувывсоте.

Соотношение (5) получено в приближении, что: $\Delta\omega \ll \omega_M$ и $\prod_{i=1}^4 r_i \rightarrow 1$

В нем также учтено, что:

$$2\Delta\omega_{1/2} = \frac{\omega_M}{F}; \quad (6)$$

$$F = \pi \frac{\prod_{i=1}^4 (r_i)^{1/2}}{1 - \prod_{i=1}^4 r_i}; \quad (7)$$

Последняя величина называется Finesse и представляет собой добротность рассматриваемого оптического резонатора для колебания с наименьшим продольным индексом $q = 1$.

Воспользовавшись соотношением (5), определим коэффициент увеличения интенсивности падающего пучка резонатором. В общем случае он зависит от сдвига между частотой падающей волны ω и собственной частотой резонатора ω_q .

$$Enh = \frac{t_1^2}{\left(1 - \prod_{i=1}^4 r_i \right)^2 \left[1 + \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{1/2}} \right)^2 \right]}; \quad (8)$$

Чтобы определить аналогичные характеристики резонатора Фабри-Перо из найденных для кольцевого резонатора, воспользуемся соответствующей заменой коэффициентов отражений третьего и четвертого зеркал, о которых говорилось выше. В результате получим следующие соотношения:

- для резонансной частоты:

$$\omega_q = \omega_M \left(q + 1 + \frac{\sum_{i=1}^4 \varphi_i}{2\pi} \right); \quad (4a)$$

- для амплитуды поля:

$$\dot{E}_{\text{вытп}} = \frac{t_1 e^{-i \arctg(\Delta\omega/\omega_{1/2})}}{1 - r_1 r_2 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{1/2}} \right)^2}}; \quad (5a)$$

- для полосы пропускания соотношение (6) остается неизменным.

- для Finesse:

$$F = \pi \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2}; \quad (7a)$$

- для коэффициента увеличения резонатором интенсивности падающей волны:

$$Enh = \frac{t_1^2}{(1 - r_1 r_2)^2 \left[1 + \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{1/2}} \right)^2 \right]}; \quad (8a)$$

Анализ полученных соотношений показывает, что если резонаторы образованы отражателями с одинаковыми коэффициентами отражения и прохождения ($\hat{r}_i = \hat{r}$ и $\hat{t}_i = \hat{t}$), то преимуществом обладает двухзеркальный резонатор. Эффект усиления энергии падающего пучка у него выше в 4 раза (рис.2). Расчеты выполнены для резонаторов с коэффициентом отражения зеркал $R = r^2 = 0.9995$ и коэффициентом пропускания $T = t^2 = 0.0005$. Этот резонатор имеет и более высокую добротность. Что касается его полосы пропускания, то она зависит еще и от межмодовой частоты резонатора. Последняя определяется его длиной и выбирается из конкретных требований эксперимента.

Если в кольцевом резонаторе использовать более высококачественные зеркала (стоимость их значительно выше), например, такие что

$$(\hat{r}_2 \hat{r}_3 \hat{r}_4)_{\text{кольцевой}} = (\hat{r}_2)_{\text{Ф.П.}},$$

то он по характеристикам будет полностью идентичен резонатору Фабри-Перо. Таким образом, предпочтение при выборе типа резонатора для накопления лазерных импульсов следует отдавать тому, который обеспечивает необходимую «перетяжку» резонансного пучка и имеет меньшую стоимость.

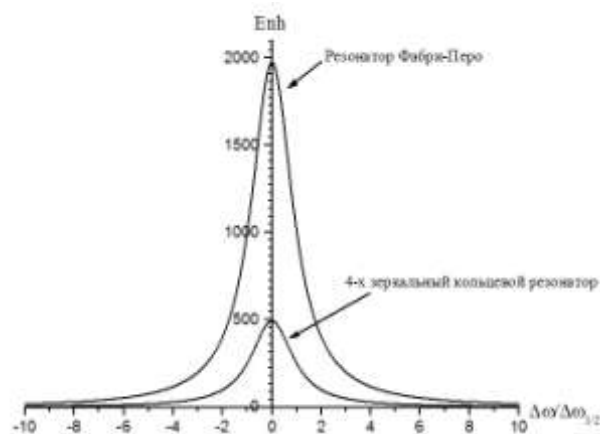


Рис. 2. Зависимость коэффициента увеличения интенсивности падающего пучка резонатором от сдвига его собственной частоты от несущей частоты лазерного излучения, нормированного на полуширину резонансной кривой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе сравнение энергетических характеристик Фабри-Перо и 4-х зеркального кольцевого резонаторов показало, что при соответствующем выборе отражателей, они обладают одинаковыми возможностями. Небольшое преимущество резонатору Фабри-Перо, может дать его стоимость и несколько меньшие трудности, в процессе его юстировки и настройки. Однако, в тех случаях, когда формирование необходимой «перетяжки» резонансного волнового пучка в этом резонаторе приводит к значительному увеличению его размеров на зеркалах и, как следствие, - к большим дифракционным потерям, предпочтение следует отдать 4-х зеркальному кольцевому резонатору. Его геометрия позволяет их существенно снизить.

На основе, полученных в работе соотношений, можно достаточно легко определить основные энергетические параметры резонаторов, оценить их частотные характеристики. Развитый в работе подход, может оказаться полезным для других исследователей и использоваться ими при изучении свойств новых типов резонаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Urakawa at al. Laser Super Cavity. Paper TH2-4 presented at the 21-th ICFA beam dynamics work-shop on Laser-Beam Interactions, June 11-15, 2001, Stony Brook, NY, USA.
2. R.J. Loewen. A compact light source: design and technical feasibility study of a laser – electron storage ring X – ray source, Ph. D. thesis, SLAC – R – 632, Stanford University, Stanford, 2003, 105p.
3. M. Nomura, K Hirano, M. Takano et al. Enhancement of laser power from a mode lock laser with an optical cavity// European Particle Accelerator Conf. Luzern, Switzerland, 2004, p.2637-2639
4. V.P. Androsov, I.M. Karnaukhov, Yu.N. Telegin. The system of enclosed optical cavities as a tool for laser photons storing. Problems of atomic science and technology. 2004. № 2. с.105-107
5. V.P. Androsov, I.M. Karnaukhov and Yu.N. Telegin. Coherent stacking of laser pulses in a high-Q optical cavity for accelerator applications :e-preprint, <http://arxiv.org/list/physics/0407028>, 2004, 11p.