

Об электромагнитных резонаторах открытого типа: связь между интерферометрами и резонаторами

А.А.Маненков, В.П.Быков

Обсуждается физическое различие понятий «интерферометр Фабри–Перо» и «резонатор открытого типа». Показано, что использование термина «резонатор Фабри–Перо» применительно к лазерному резонатору открытого типа некорректно как с исторической точки зрения, так и с точки зрения физического смысла процессов, происходящих в этих резонаторах.

Ключевые слова: оптический резонатор, лазерный резонатор, мода, интерферометр,

В литературе, относящейся к оптическим (лазерным) резонаторам, при описании устройства и свойств резонаторов, образованных двумя плоскопараллельными отражающими пластинами (или поверхностями твердотельных оптических элементов), иногда используется термин «резонатор Фабри–Перо» (см., напр., [1–3])*. В данной заметке рассматривается связь между оптическими устройствами типа интерферометра Фабри–Перо (ФП) и резонаторами открытого типа и обсуждается корректность использования приведенного выше термина.

Начнем обсуждение вопроса с исторической справки. Предложение резонатора открытого типа для квантовых генераторов субмиллиметровых волн было впервые сделано А.М.Прохоровым [4]. Как известно (см., напр., [5, 6]), это предложение стало одним из ключевых факторов, обусловивших распространение принципов квантовой электроники на область коротких волн электромагнитного спектра, включающую оптический диапазон. В работе [4] А.М.Прохоров проанализировал свойства резонатора, образованного двумя плоскопараллельными отражающими пластинами (дисками), линейные размеры которого много больше длины волны возбуждаемого в нем излучения (в квантовых генераторах СВЧ диапазона – мазерах – использовались объемные резонаторы закрытого типа, размеры которых сопоставимы с длиной волны излучения). Анализ показал, что открытый резонатор может обладать достаточно высокой добротностью. Первая экспериментальная реализация такого резонатора в миллиметровом диапазоне длин волн [6, 7] подтвердила этот вывод.

*Прим. авторов. Хотя учебное пособие [2] названо «Fabry–Perot Resonator», т. е. «Резонатор Фабри–Перо», в нем лишь упоминается об использовании этого устройства в качестве лазерного резонатора; весь же анализ его работы дан как анализ именно «интерферометра Фабри–Перо».

А.А.Маненков, В.П.Быков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;
e-mail: manenkov@kapella.gpi.ru; vpb@qwerty.ru

Поступила в редакцию 6 мая 2009 г.

После публикации работы [4] в печати появилась статья Шавлова и Таунса [8], содержащая детальный анализ возможности создания мазера в ИК и оптическом диапазонах. Среди различных аспектов проблемы в ней анализировался вопрос о резонаторе для таких мазеров. Так, была отмечена особенность объемных резонаторов в оптическом диапазоне, отличающая их от резонаторов радио- и микроволнового диапазонов и связанная с большим числом типов колебаний (мод), возбуждаемых в оптических резонаторах (размеры которых в практических условиях много больше длины волны), а также обсуждались методы селекции мод, необходимой для достижения условий мазерной генерации. Авторы [8] пришли к выводу о возможности применения в качестве резонатора интерферометра ФП – устройства из двух отражающих плоскопараллельных пластин, т. е., по существу, резонатора открытого типа, предложенного в работе [4]. Анализируя моды такого резонатора, авторы отмечают связь между интерферометром ФП и обычными резонаторами микроволнового диапазона, приводя при этом ссылки на работу А.М.Прохорова [4] и патент Дикке [9] (в форме примечания, добавленного при корректуре). Вот эта ссылка, полностью воспроизведенная из статьи [8]: ‘Use of two parallel plates for maser operating at short wavelength has also recently been suggested by A.M.Prokhorov [JETP, 34, 1658 (1958)] and by R.H.Dicke [US Patent, 2, 851, 652 (September 9, 1958)]. These sources do not, however, discuss the reduction of excess modes or spontaneous emission.’ («Использование двух параллельных пластин для работы мазеров при коротких длинах волн недавно было предложено А.М.Прохоровым [ЖЭТФ, 34, 1658 (1958)] и Р.Х.Дикке [Патент США, 2, 851, 652 (Сентябрь 9, 1958)]. Однако в этих источниках не обсуждается уменьшение числа излишних мод или спонтанного излучения».)

Отмеченная связь между интерферометром ФП и резонатором открытого типа и стала, по-видимому, поводом к появлению в последующих работах по лазерным резонаторам термина «резонатор Фабри–Перо». Использование этого термина для обозначения резонаторов открытого типа является, по нашему мнению, некорректным, поскольку предполагает тождественность свойств интерферометра и резонатора, что неверно.

Интерферометр ФП относится к классу многолучевых интерферометров, в которых используется явление интерференции параллельных пучков когерентных электромагнитных волн, образующихся при многократном отражении от зеркал проходящего через них излучения [10]. На выходе такого прибора образуется система интерференционных полос (колец), структура которых определяется спектральными свойствами (составом) падающего пучка. Анализ такой структуры позволяет использовать интерферометр ФП как спектральный прибор. Разрешающая способность прибора характеризуется параметром финес (finesse), который определяется свойствами интерференционных полос – их относительным расположением и шириной. В резонаторе открытого типа, конструктивно аналогичном интерферометру ФП, происходит возбуждение *собственных типов колебаний (мод)* электромагнитного поля. Частоты и пространственная структура электрических и магнитных полей таких колебаний определяются структурой и свойствами отражающих поверхностей резонатора – геометрическими факторами (поперечными и продольными размерами) и отражательной способностью зеркал. Так, для основного (низшего) типа колебаний ТЕМ_{00q} ($q \gg 1$ – целое число) структура электрического поля в резонаторе описывается формулой [11]

$$E_x(r, z) = AJ_0(v(r/r_0)) \left\{ \begin{array}{l} \sin[z(k - \Delta k)] \\ \cos[z(k - \Delta k)] \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; v – наименьший корень этой функции; r_0 – радиус пластин резонатора; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число моды, определяемое соотношением

$$kl = \pi(q + l\Delta k); \quad (2)$$

$\Delta k \simeq v^2/(\pi k r_0^2)$ – небольшая дифракционная добавка к волновому числу; l – расстояние между пластинами; λ – длина волны и A – нормировочный множитель.

Основным параметром, характеризующим качество резонатора любого типа, является добротность Q , которая определяется геометрическими параметрами резонатора, длиной волны возбуждаемых волн и потерями излучения, обусловленными поглощением в стенках зеркал или в заполняющей резонатор среде, дифракцией излучения на апертуре зеркал и искажениями волнового фронта в среде. Так, для простого случая открытого резонатора, образованного двумя плоскопараллельными пластинами, добротность Q определяется соотношением [4]

$$Q = \frac{2\pi l}{\lambda(1 - R)}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения пластин. Важным параметром резонатора является также характерное время τ затухания колебания, которое связано с добротностью простым соотношением:

$$\tau = Q/\omega, \quad (4)$$

где ω – частота собственного типа колебаний электромагнитного поля. Из приведенного выше анализа следует, что, хотя интерферометр ФП и резонатор открытого типа конструктивно подобны, по своим свойствам эти устройства различны. В первом используется *интерференция* волн от внешнего источника излучения, во втором – резонансные свойства *собственных типов колебаний* (мод) электромагнитного поля, возбуждаемых под действием внешнего или внутреннего (как в лазере или лазере) источника.

В контексте данной заметки важно отметить, что при анализе свойств интерферометра ФП понятие *собственные типы колебаний (моды)* вообще отсутствовало вплоть до появления лазеров (интерферометр рассматриваемого типа был предложен французскими физиками Ш.Фабри и А.Перо в 1897 г. и на протяжении XX века анализировался в огромном числе работ). Это понятие, да и весь физический и математический формализм при анализе оптических резонаторов, возникли в связи с развитием квантовой электроники – переносом ее принципов из области СВЧ, где это понятие и формализм были хорошо развиты, в оптический диапазон. В этом отношении статья А.М.Прохорова [4] и последовавшая за ней статья А.Шавлова и Ч.Таунса [8] являются пионерскими.

Из изложенного ясно, что в применении к резонатору открытого типа термин «резонатор Фабри–Перо» не является корректным ни с исторической точки зрения, поскольку не соответствует, как было показано выше, действительному развитию представлений об оптических резонаторах, ни с точки зрения физического смысла происходящих в резонаторе процессов. Отметим также, что применение этого термина искажает ключевую для квантовой электроники идею перехода к резонаторам открытого типа.

Авторы выражают благодарность В.П.Макарову за полезные обсуждения.

1. Полуэктов И.А., Беленов Э.М. *Открытый резонатор. Квантовая электроника – Малая энциклопедия* (М.: Сов. энциклопедия, 1969, с. 325).
2. Dickmann K. <http://repairfaq.ece.drexel.edu/sam/MEOS/EXP03.pdf>.
3. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 2008).
4. Прохоров А.М. *О молекулярном усилителе и генераторе на субмиллиметровых волнах. ЖЭТФ*, **34**, 1658 (1958).
5. Prokhorov A.M., Manenkov A.A. *History, Current Status and Outlook to the Future of High Power Solid State Lasers. High power lasers – Science and Engineering*. R.Kossewsky et al. (eds) (Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1996, pp. 585–601).
6. Bagaev S., Krokhin O., Manenkov A. *Pages from the History of Quantum Electronics Research in the Soviet Union. J. Modern Opt.*, **52** (12), 1657 (2005).
7. Барчуков А.И., Прохоров А.М. *Экспериментальное исследование дисковых резонаторов в миллиметровом диапазоне длин волн. Радиотехника и электроника*, **4** (12), 2094 (1959).
8. Schawlow A.L., Townes G.H. *Infrared and Optical Masers. Phys. Rev.*, **112** (6), 1940 (1958).
9. Dicke R.H. US Patent 2, 851, 652 (September 9, 1958).
10. Ландсберг Г.С. *Оптика* (М.: Наука, 1976).
11. Вайнштейн Л.А. *Открытые резонаторы и открытые волноводы* (М.: Сов. радио, 1967).