

В.А. Чуриков

Кольцевой резонатор для рентгеновского лазера на зеркалах скользящего падения

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 20.12.2001 г.

Предлагается простой резонатор для рентгеновского диапазона, работа которого основана на рентгеновской оптике скользящего падения. Резонатор – открытый и аксиально-симметричный, состоит из двух зеркал, оптические оси которых совпадают. По характеру работы резонатор кольцевой. Индуцированное излучение в нем формируется в противоположных бегущих волнах – главный и обратный пучки. Приведено условие, при котором возможно усиление в рентгеновском лазере с таким резонатором.

Для создания рентгеновских лазеров, работающих в режиме генерации, необходимо создание достаточно эффективных резонаторов. Несмотря на то что рентгеновская оптика значительно уступает «обычной» оптике по своей эффективности для рентгеновских лазеров, было предложено несколько типов резонаторов, например, резонаторы на брэгговском отражении из многослойных зеркал [1, 2] и, в частности, перестраиваемый резонатор с такими зеркалами [3]. В рентгеновском лазере на установке «Nova» был создан «резонатор» на одном многослойном зеркале с коэффициентом отражения примерно 15% [4, 5] и использованный в большей степени для юстировки. Был еще предложен кольцевой резонатор на рентгеновской оптике скользящего падения [6].

Предлагаемый резонатор состоит из двух зеркал, расположенных соосно, т. е. их оптические оси совпадают (рис. 1 и 2).

Отражательная способность зеркал основана на рентгеновской оптике скользящего падения. Рентгеновские лучи в таких зеркалах распространяются вдоль поверхности путем многократных отражений под малыми углами θ , меньшими критического угла Брюстера θ_c , при котором происходит полное отражение, $\theta_c \approx |\delta^{1/2}| > \theta$, где δ – показатель преломления вещества зеркала. Такие углы отражения называют углами скольжения.

Сами зеркала представляют собой поверхности вращения некоторой образующей кривой вокруг оси, которая совпадает с оптической осью зеркала. В результате получается аксиально-симметричная поверхность зеркала. Образующая кривая может быть частью окружности или другой кривой, по-разному ориентированной относительно оси вращения. Возможность варьировать геометрии поверхности с целью изменения свойств рентгеновского излучения говорит об определенной гибкости такого резонатора.

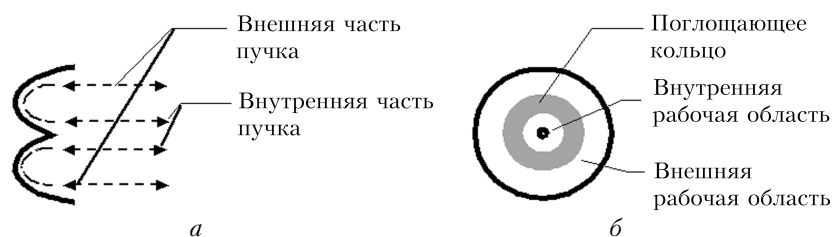


Рис. 1. Схема зеркала скользящего падения рентгеновского резонатора. Вид сбоку (а) и с торца (б)

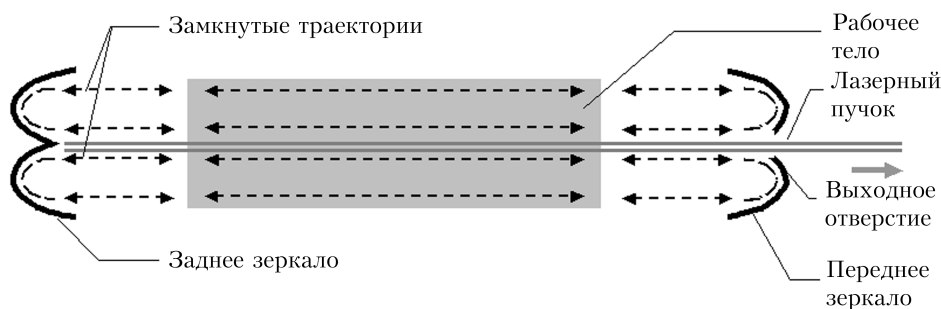


Рис. 2. Принципиальная схема кольцевого резонатора

Серым цветом на рис. 1,б показана кольцевая область зеркала с пониженной отражательной способностью, если рентгеновские кванты на зеркало падают параллельно оптической оси. Эта область в зеркале не работает, или ее работа малоэффективна, ее будем называть *поглощающим кольцом*. Кольцевые области белого цвета, лежащие с внешней и с внутренней стороны *поглощающего кольца*, являются соответственно *внешней* и *внутренней рабочими областями*. Хотя реально переходы между рабочими и нерабочей областями будут несколько размыты.

Такой резонатор является аксиально-симметричным открытым резонатором. Замкнутая траектория рентгеновских квантов внутри резонатора говорит о том, что данный резонатор является своеобразным кольцевым резонатором. Индуцированное излучение в таком резонаторе будет формироваться в двух противоположно направленных бегущих волнах и формировать *главный* и *обратный пучки*. Стоячие волны в таком резонаторе формироваться не будут.

В правом зеркале, как показано на рис. 2, часть рентгеновского излучения внутренней части главного пучка отводится через центральное отверстие, а другая часть направляется по кольцевой траектории через рабочее тело лазера, где оно усиливается.

Исходя из качества обработки поверхности зеркал и геометрии поверхности отражения, нетрудно предположить, что распределение интенсивности рентгеновского излучения в луче лазера может иметь радиально неоднородную структуру, с минимумом в центре и с максимумом ближе к внешней границе пучка, т.е. в поперечнике луч лазера может иметь

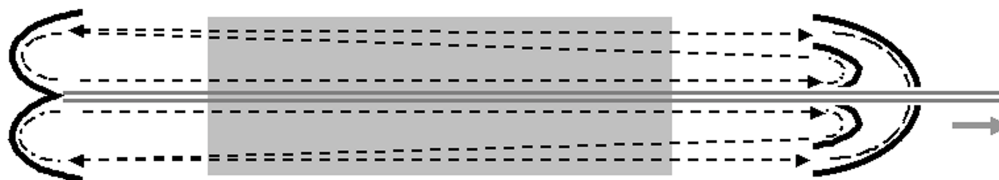


Рис. 3. Принципиальная схема кольцевого резонатора с совмещением главного и обратного пучков

«трубчатую» структуру, что не всегда удобно. Более однородным выходящий пучок лазера можно сделать путем соответствующей корректировки левого зеркала, но это, в свою очередь, может привести к увеличению расходимости лазерного пучка.

Возможен вариант резонатора, когда из обратной волны часть излучения так же отводится через аналогичное отверстие в левом зеркале (симметричный вариант резонатора). Но для повышения эффективности работы резонатора и повышения однородности лазерного пучка желательнее обратный пучок формирующегося индуцированного излучения направить в главный пучок.

Возможен еще вариант, когда обратная волна поворачивается на 180° с помощью *возвратной петли*, которая представляет собой петлю из капилляра, вдоль которого рентгеновские кванты путем многократных отражений от его внутренней поверхности

поворачиваются на 180° и направляются в то же самое отверстие в левом зеркале. Возвратная петля была предложена в [6].

Если правое зеркало заменить системой двух зеркал, как показано на рис. 3, то возможность использования обратной волны будет решена другим способом, в чем легко убедиться, просмотрев направления движения рентгеновских квантов вдоль траекторий. В таком резонаторе объем в рабочем теле будет задействован больше, чем в резонаторе на рис. 2, что дополнительно повысит его эффективность. Возможны и другие способы реализации резонатора, в котором обратный пучок или не формируется, или поворачивается и направляется в главный пучок.

Опишем работу резонатора. Поток рентгеновских квантов, выходящих с переднего торца рабочего тела (см. рис. 2), падает на правое зеркало, где благодаря отверстию пучок разделяется на выходящий лазерный пучок, а остальная часть радиально расходится по поверхности зеркала и поворачивается на 180° . Кванты транспортируются вдоль поверхности зеркала, многократно отражаясь от нее под углами скольжения. После поворота рентгеновские кванты в виде пучка направляются на левое зеркало. Эта часть пучка обеспечивает обратную связь в лазере. Ее будем называть *внешней*, а *внутренней* будем называть часть пучка, формирующуюся вдоль оптической оси зеркал. Из этого пучка формируется собственно лазерный пучок (см. рис. 2). Во втором зеркале пучок тоже поворачивается на 180° , направляясь к центральной части зеркала, а затем в сторону правого зеркала. После этого цикл повторяется.

При работе лазера с таким резонатором возможна ситуация, при которой через рабочее тело проходит и испытывает усиление только внутренняя часть главного пучка (*однопроходный режим*), или обе части пучка – как внутренняя, так и внешняя, см. рис. 2 (*двухпроходный режим*). Вынужденное излучение квантов осуществляется при их прохождении через рабочее тело, и чем больше расстояние, которое проходит квант в рабочем теле, тем эффективнее усиление. Поэтому работа рентгеновского лазера в двухпроходном режиме существенно повысит эффективность резонатора.

Для интенсивности лазерного пучка будет выполняться следующее соотношение:

$$I = I_0 k R (1 - \beta_1 - \beta_2) \exp(q b l \sigma \Delta N). \quad (1)$$

Здесь I – интенсивность пучка после завершения полного цикла; I_0 – его начальная интенсивность;

$\Delta N = N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 > 0$ – инверсия населенностей лазерных уровней; N_1 и N_2 – концентрации излучающих систем (например ионов), находящихся соответственно на верхнем и нижнем лазерных уровнях, а g_1 и g_2 – статистические веса уровней. Коэффициенты q и b принимают значения $q = 1$ для однопроходного режима и $q = 2$ для двухпроходного режима, $b = 1$ – для резонатора, использующего для генерации только главный пучок (см. рис. 1), и $b = 2$ – для резонатора, использующего как главный, так и обратный пучки (см. рис. 2); l – длина рабочего тела лазера, которое предполагается приблизительно равным для обоих типов резонаторов (см. рис. 1 и 2); $\sigma = (8\pi)^{-1} v^{-2} c^2 A_{21} g(v - v_0)$ – сечение индуцированного излучения, где, в свою очередь, v и v_0 , соответственно, частота излучения и резонансная частота лазерного излучения, A_{21} – вероятность спонтанного перехода между лазерными уровнями, $g(v - v_0)$ – профиль линии. Далее в (1) β_1 и β_2 – потери на рассеяние и на поглощение в среде; k – часть потока рентгеновского пучка, остающаяся в резонаторе после выделения лазерного луча ($1 \geq k \geq 0$); R – коэффициент проводимости поверхности зеркала резонатора [7]:

$$R = \exp(-\psi \gamma \delta^{-3/2}), \quad (2)$$

где ψ – угол поворота; δ – показатель преломления вещества зеркала; γ – показатель поглощения вещества зеркала, которые определяются через атомные факторы рассеяния f_1 и f_2 , которые затабулированы в [8]:

$$\delta = (2\pi)^{-1} N_a r_e \lambda^2 f_1, \quad \gamma = (2\pi)^{-1} N_a r_e \lambda^2 f_2; \quad (3)$$

N_a – плотность атомов; $r_e = e^2 m^{-1} c^{-2}$ – классический радиус электрона; λ – длина волны рентгеновского излучения (δ и γ подробно рассматриваются в [9]). Для различных веществ и различных длин волн значение коэффициента R обычно лежит в пределах 0,1÷0,4. Условием работы лазера является достижение критической инверсии ΔN_c , которую легко получить из (1) и (2):

$$\Delta N_c = -\frac{\chi}{qbl\sigma} = \frac{8\pi v^2}{c^2 q b l A_{21} g(v_0)} \times \{360^\circ \gamma \delta^{3/2} - \ln[k(1 - \beta_1 - \beta_2)]\}, \quad (4)$$

где учтено, что угол поворота $\psi = 360^\circ$, т. е. за один цикл; введены логарифмические потери в резонаторе $\chi = 360^\circ \gamma \delta^{-3/2} - \ln(k(1 - \beta_1 - \beta_2))$ и профиль линии взят при $v = v_0$.

Нормальная работа резонатора возможна, когда время существования инверсии населенностей в рабочем теле τ больше или сравнимо со временем прохождения одного цикла $\tau_c = c^{-1} L \approx 3,3 \times 10^{-8}$ с, где L – средняя длина пути, которую проходят кванты за каждый цикл. Для оценки принято значение $L \approx 10$ см. В случае, если рабочим телом является лазерная плазма или плазма сильноточных разрядов,

то время их существования вполне реализуемо в пределах 10^{-9} ÷ 10^{-8} с. Так что условие $\tau > \tau_c$ выполняется при надлежащей длительности накачки, в качестве которой можно использовать фотонакачку, рекомбинационную или комбинированную накачку.

Предлагаемый резонатор работает в достаточно широком диапазоне рентгеновского излучения, и менять этот диапазон можно подбором материала, из которого делаются зеркала.

При двухпроходном режиме работы резонатора и однородной плотности инверсии населенности в рабочем теле наблюдается следующая особенность. При переходе из внутренней во внешнюю часть пучка плотность излучения падает, поскольку поперечное сечение внутреннего пучка s меньше сечения внешнего пучка S . Причем сечения во внешней и во внутренней частях пучка можно принять равными площадям соответственно внешней и внутренней частей рабочих областей зеркал. И наоборот, при переходе из внешней части пучка во внутреннюю плотность пучка увеличивается. Если не учитывать потери при транспортировке квантов вдоль поверхности зеркал и потери на излучение лазерного пучка, то будет справедливо соотношение плотностей внутреннего j_0 и внешнего j_1 пучков для зеркал резонатора:

$$I_0 = S j_1 = s j_0.$$

Ввиду большей плотности излучения во внутренней части пучка возможно, что при достаточном его усилении достигнимо насыщение, когда инверсия населенностей уровней становится равной нулю – $\Delta N = 0$. В этом случае для внутренней части пучка процессы усиления и поглощения уравниваются и наступает «просветление» среды, а во внешней части пучка ввиду меньшей его плотности усиление еще возможно.

Предложенный принцип создания резонаторов дает возможность на подобных зеркалах создавать большое количество различных вариантов рентгеновских резонаторов. При этом можно варьировать такими параметрами, как количество зеркал, количество проходов пучка через рабочее тело, наличие и количество зеркал, которые можно вкладывать в другие, геометрия поверхностей зеркал, взаимное расположение фокусов зеркал, расположение отверстий для выведения лазерного излучения и их количество и т. д.

Добротность и устойчивость резонаторов, а также различные варианты их аналогов требуют отдельного рассмотрения.

Данный резонатор в отличие от предложенного ранее [6] представляется более компактным, более технологичным, а лазерный пучок, формируемый в таком резонаторе, будет радиально симметричным.

1. Bond W.L., Duguay P.M., Rentzepis P.M. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10. P. 216.
2. Deslattes R.D. // Appl. Phys. Lett. 1968. V. 12. P. 133.

3. *Cotterill R.M.J.* // Appl. Phys. Lett. 1968. V. 12. P. 403.
4. *Matthews D.L., Hagelstein P.L., Rosen M.D. et al.* Demonstration of a Soft X-Ray amplifier // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. № 2. P. 110–114.
5. *Nilson D.G., Brown S.B., Keane C.J., Macgowan B.J., Matthews D.L., Trebes J.E., Wood O.R., Silfoast W.T.* Soft X-ray laser pointing and focusing experiments // Laser and Particle Beams. 1988. V. 6. № 2. P. 751–756.
6. *Чуриков В.А.* Кольцевой резонатор для рентгеновского лазера // Вест. ТГПУ. 1988. № 5. С. 56–57.
7. *Кожевников И. В.* Рентгеновская оптика. М.: Наука, 1989. С. 143–167. (Тр. ФИАН, 1989. N. 196. 182 с.).
8. *Henke B.L., Lee P., Tanaka T.L., Simabukuro R.L., Fujikawa B.K.* // At. Data and Nucl. Data Tabls. 1982. V. 27. P. 1.
9. *Блохин М. А.* Физика рентгеновских лучей. М.: ГИТТЛ, 1957. 518 с.

V.A. Churikov. The ring resonator for the x-ray laser on mirrors of sliding fall.

The simple resonator for the x-ray range is offered, which work is based on x-ray optics of sliding fall. The resonator consists of two mirrors, whose optical axes coincide. The resonator is open and axial-symmetric. By the character of work, the resonator is ring. The radiation in it is formed in opposite running waves, main and opposite beams. The condition is given, under which the amplification is possible in the x-ray laser with such a resonator.