

07;10  
©1995

## ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ЖЕЛОБКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ — НОВЫЙ КЛАСС ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*Ф.Ф.Барышников, Г.А.Богатова, В.В.Перебейнос*

1. Особенностью лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) является очень узкая излучающая область, что при высокой мощности излучения приводит к необходимости увеличивать длину оптического резонатора с тем, чтобы световой пучок на зеркалах оптического резонатора стал достаточно широким [1]. Для решения этой проблемы предложено немало оптических схем на основе несферических зеркал скользящего падения, см., например, [2-5]. Зеркальные поверхности при этом имеют либо цилиндрическую, либо внеосевую параболическую или гиперболическую форму. Такие поверхности трудны в изготовлении, а резонаторы на их основе сложны для контроля и юстировки.

При уменьшении базы оптического резонатора возникает еще одна проблема. Для получения мощного излучения общепринятым является использование оптического резонатора только для пространственной модуляции плотности электронного пучка. Мощное выходное излучение ЛСЭ формируется в дополнительном модуляторе, расположенном вне оптического резонатора. При этом в резонаторах с короткой базой трудно провести электронный пучок мимо зеркал, сохранив его когерентность. Резонаторы с центральным отверстием решили бы эту проблему, но в используемых в настоящее время резонаторах центральное отверстие располагается в области максимальной интенсивности излучения, что может привести к большим потерям.

В ГП ОКБ "Гранат" разработаны конструкции перекрестных желобковых оптических резонаторов (ПЖР), в которых решаются перечисленные выше проблемы. Так, ПЖР формируют основную моду, имеющую относительно большой размер на зеркалах и малый размер в области взаимодействия светового и электронного пучка. Кроме того, ПЖР обладают центральным отверстием, расположенным за пределами каустики, что исключает потери в резонаторе и может быть использовано для ввода и вывода электронного пучка. И наконец, зеркала ПЖР обладают полной криво-

вой симметрией, что облегчает их изготовление, контроль поверхности, юстировку резонатора и управление его работой. Некоторые конкретные практические схемы ПЖР впервые предложены в работе [6].

В настоящей работе продемонстрировано основное качество ПЭР — узкий диаметр световой моды в области перетяжки, относительно большая площадь рабочей поверхности зеркал и возможность использования центральных отверстий, расположенных вне области формирования электромагнитного поля в резонаторе для транспортировки электронного пучка.

Отметим, что резонаторы желобкового типа с осепараллельными элементарными резонаторами для лазеров с кольцевым распределением поля рассматривались в работе [7]. В отличие от этих резонаторов в ПЖР используются перекрестные элементарные резонаторы, что и приводит к новым свойствам.

2. Представим себе элементарный устойчивый резонатор, ось которого наклонена под углом  $\theta$  к некоторой главной оси, а центр перетяжки располагается на этой же оси в некоторой центральной точке. Осуществим вращение системы вокруг главной оси, в результате получим кольцевую желобковую оптическую структуру, которую будем называть перекрестным желобковым резонатором. ПЖР может быть устойчивым резонатором как в меридиональном, так и в сагиттальном сечениях. Параметры ПЖР, естественно, зависят от параметров элементарных резонаторов и от угла скрещивания  $\theta$  элементарных резонаторов, т.е. вблизи зеркал около главной оси поле может быть сделано экспоненциально малым [8].

С другой стороны, нас также интересует поле в центре резонатора, где обычно располагается ондулятор ЛСЭ. Детальный анализ поля требует решения волновых уравнений для открытых резонаторов, см., например, [8]. В настоящем сообщении мы ограничимся рассмотрением простой модели. Будем считать, что угол  $\theta \ll 1$ , а поперечный размер  $\beta$  центральной каустики каждого элементарного резонатора удовлетворяет условию  $\beta \gg \Lambda\theta$ , где  $\Lambda$  — длина ондулятора. Если аппроксимировать поле каждого элементарного резонатора гауссовым пучком, то при описанных выше условиях азимутально однородное поле резонатора в области ондулятора запишется в виде [9]

$$u = \frac{W_0}{W} \exp \left( i\phi - i\frac{k}{2R}\rho^2 - \frac{\rho^2}{W^2} \right) \langle \exp(-ik \cdot \mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

где по сравнению с обычной гауссовой модой появился множитель с экспонентой, усредненной по направлениям осей

элементарных резонаторов. Произведя это усреднение, получим вместо (1)

$$u = \frac{W_0}{W} \exp \left( i\phi - i \frac{k}{2R} \rho^2 - \frac{\rho^2}{W^2} \right) I_0 \left( k \cdot \rho \cdot \sin(\theta) \right), \quad (2)$$

где  $I_0$  — функция Бесселя нулевого порядка.

Из (2) видно, что каустика элементарного резонатора оказалась промодулированной множителем с характерным поперечным масштабом  $\rho = 1/k\theta$ .

Для элементарного конфокального резонатора, например, размер центральной каустики равен  $\rho_k = (L/k)^{1/2}$ , где  $L$  — длина резонатора. Полагая  $\rho \ll \rho_k$ , получим условие сужения поперечного размера каустики в виде

$$1/(kL)^{1/2} \equiv \theta_0 \ll \theta \ll 1. \quad (3)$$

Для  $L = 10$  м,  $\lambda = 10$  мкм получим  $\theta_0 = 0.4 \cdot 10^{-3}$  рад. Резонаторы, проектируемые в ОКБ "Гранат", имеют угол скрещивания  $\theta \approx 10^{-3}$  рад.

Подчеркнем, что наряду с уменьшением поперечного размера светового пятна в центре резонатора (в месте расположения ондулятора) мы получим эффективное увеличение площади рабочей поверхности зеркал резонатора, которые теперь состоят из множества элементарных резонаторов.

4. Перечислим в заключение основные особенности ПЖР, которые делают их особенно перспективными для ЛСЭ:

ПЖР допускают транспортировку электронного пучка через центральное осевое отверстие, которое лежит за пределами каустики резонаторной моды.

ПЖР позволяют снизить лучевую нагрузку на зеркала резонатора и перейти к использованию неохлаждаемых зеркал.

ПЖР позволяют резко уменьшить базу резонатора.

ПЖР обладают повышенной интенсивностью светового поля в области ондулятора, что благоприятно для эффективного взаимодействия электромагнитного поля с электронным пучком и для его пространственной группировки.

ПЖР могут быть устойчивыми в любом сечении, что важно для снижения потерь.

ПЖР обладают полной круговой симметрией, что облегчает их изготовление, юстировку и контроль в процессе работы ЛЭС.

## Список литературы

- [1] *Маршалл Т.* Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987. 240 с.
- [2] *Borghese A., Canevari R., Donati V., Garito L.* // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 20. P. 3547.
- [3] *Shin C.C., Neil G.R.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A. 1987. V. 259. P. 312.
- [4] *Viswanathan V.K., Sarman A., Woodfin G.* // Proc. SPIE. 1985. V. 540. P. 227.
- [5] *Eggleston J.M., Slater J.M.* // IEEE J. Quant. Electr. 1987. V. QE-22. N 9. P. 1527.
- [6] *Богатова Г.А., Перебейнос В.В., Чебуркин Н.В.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A. 1995 (в печати).
- [7] *Casperson L.W., Shekhani M.S.* // Appl. Opt. 1975. V. 14. N 11. P. 2653.
- [8] *Вайнштейн А.М.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966.
- [9] *Гончаренко А.М.* Гауссовы пучки света. Минск: Наука и техника, 1977. С. 144.

ГП ОКБ "Гранат"  
Москва

Поступило в Редакцию  
13 июня 1995 г.

---