

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНАРНЫХ МАЗЕРОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ДВУМЕРНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

А. В. Аржанников, В. Б. Бобылев*, Н. С. Гинзбург**, В. Г. Иваненко*, П. В. Калинин*,
С. А. Кузнецов*, Н. Ю. Песков**, А. С. Сергеев**, С. Л. Сеницкий*, В. Д. Степанов**

**Институт ядерной физики СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

***Институт прикладной физики РАН, 603600 Нижний Новгород, Россия*

arzhannikov@inp.nsk.su

Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание многоканального планарного мазера мм-диапазона с двумерной пространственно распределенной обратной связью. Компьютерное моделирование процессов одновременной генерации нескольких ленточных пучков в одном ускорительном диоде, а также синхронизации фазы колебаний в параллельно работающих каналах мазера показывают возможность практической реализации предложенной концепции многоканального генератора. Приведены результаты экспериментов на установке ЭЛМИ с 1МэВ/3кА/3мкс ленточным пучком по генерации мощных микросекундных импульсов 4-мм излучения в отдельном канале такого многоканального генератора.

1. ВВЕДЕНИЕ

С начала 90-х годов нами развивается концепция генераторов миллиметрового электромагнитного излучения с планарной геометрией [1-4], которая базируется на использовании пучков электронов с сильно вытянутым поперечным сечением, так называемых ленточных пучков. Выбор данной концепции обусловлен двумя обстоятельствами. С одной стороны, для случая ленточного пучка, заключенного между двумя близко расположенными металлическими плоскостями, подавлено влияние собственного объемного заряда электронов на процессы транспортировки пучка и генерации излучения, и, как следствие, возможно значительное увеличение плотности тока пучка в генераторе [5, 6]. С другой стороны, ширина пучка и, следовательно, генератора излучения оказываются практически неограниченными, что дает возможность достигать уровня мощности излучения практически недоступного в других схемах генератора [7]. Для обеспечения пространственной когерентности излучения в планарных генераторах, когда их ширина на несколько порядков величины превышает длину волны, нами предложено использовать пространственно распределенную положительную обратную связь, которая создается рассеянием колебаний на брэгговских решетках с двумерной гофрировкой поверхности [3, 4, 8-10]. В экспериментальных исследованиях, проведенных по данной тематике на установке ЭЛМИ при использовании ленточного пучка с током до 3 кА, энергией электронов 0.8...1.0 МэВ и сечением 0.4x12 см, уже получены микросекундные импульсы 4-мм излучения с энергосодержанием около 100 Дж [11]. Килоджоульный уровень энергосодержания в импульсах мм-излучения может быть достигнут на основе единичного ленточного пучка с шириной около 140 см, который уже получен на ускорителе У-2 при энергозапасе более 350 кДж (см. [7]). Однако большая (~1.5 метра) ширина генератора

при малом (порядка нескольких сантиметров) зазоре между плоскостями резонатора создает значительные инженерные и технологические трудности при его изготовлении и эксплуатации. По этой причине мы несколько пересмотрели основную концепцию увеличения генерируемой мощности за счет наращивания ширины планарного генератора. В результате мы заменили большую ширину единичного планарного канала на совокупность большого числа планарных мазеров с умеренной (~20 см) шириной, которые тесно примыкают друг к другу и используют единую магнитную систему для проводки ленточных пучков и накачки поперечной скорости электронов [12]. Возможность достижения синхронизма между колебаниями во всех щелевых каналах такого многоканального генератора при их числе масштаба десяти показана в работах [13-14]. В данной работе мы приводим результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание генератора с четырьмя параллельно генерируемыми ленточными пучками, которые накачивают колебания в четырехслойной электродинамической структуре.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На рис. 1 схематично представлена компоновка 4-х канального генератора на рабочую частоту 75 ГГц. Он состоит из 4-х одинаковых модулей, каждый из которых представляет собой планарный мазер. В свою очередь, каждый такой модуль включает в себя формирователь пучка, активный ондулятор, планарный брэгговский резонатор с двумерной обратной связью и систему вывода излучения на основе брэгговского дефлектора волн. Резонаторы всех модулей соединены между собой через разрывы в боковых стенках с помощью отрезков изогнутых гладких волноводов, которые присоединены в тех участках резонаторов, где расположены входные двумерные брэгговские отражатели. Применение такого рода отражателей, с

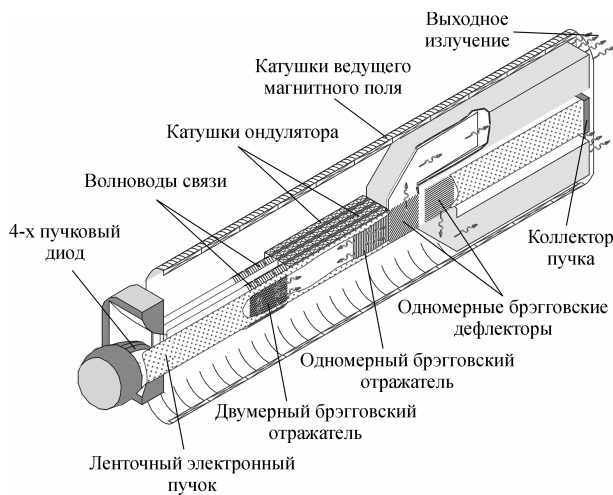


Рис. 1

одной стороны, создает условия внутри каждого резонатора для реализации двумерной распределенной обратной связи при генерации излучения в отдельном канале. С другой стороны, оно обеспечивает привязку фазы колебаний в примыкающих друг к другу генераторных модулях за счет использования поперечных потоков излучения, выходящих из этих отражателей.

Пространственно временной синхронизм электромагнитных колебаний на выходе всех модулей позволит объединить все потоки в один и обеспечить в нем высокую степень когерентности излучения при большом поперечном сечении потока. В качестве выходного отражателя в резонаторе для осуществления однонаправленного вывода излучения предполагается использовать одномерный брэгговский отражатель.

Выбор геометрии ускорительного диода для получения одновременно 4-х ленточных пучков осуществлялся по результатам компьютерного

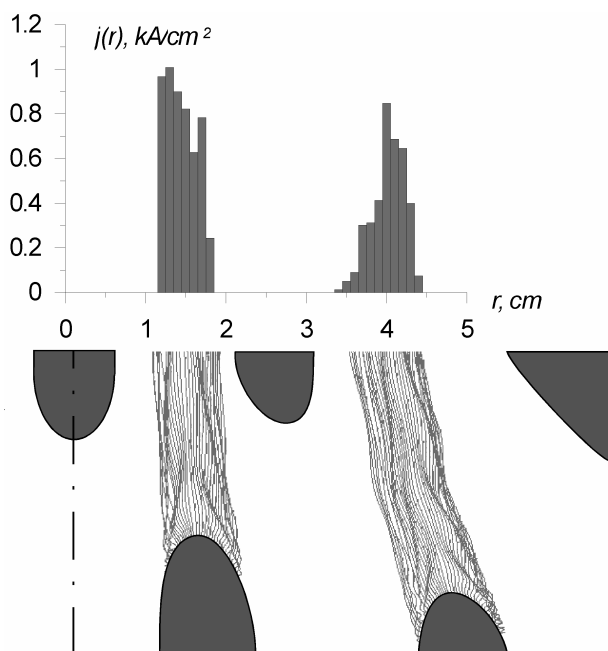


Рис. 2

моделирования самосогласованного движения электронов пучка в электрических и магнитных полях диода, которое проводилось в рамках модели трубок тока [15]. На рис. 2 показана геометрия четырехпучкового диода и траектории электронов в нем.

В силу симметрии задачи относительно плоскости, проходящей через начало координат, на рисунке представлена лишь половина ускорительного диода, содержащая два катод-анодных промежутка. На верхней части рисунка представлено распределение плотности тока пучков по сечению в анодных щелях при данной конкретной геометрии диодного промежутка. Приобретенный в неоднородностях полей угловой разброс электронов по скоростям согласно расчетам должен не превышать 5° , что вполне приемлемо для использования пучков в планарном лазере.

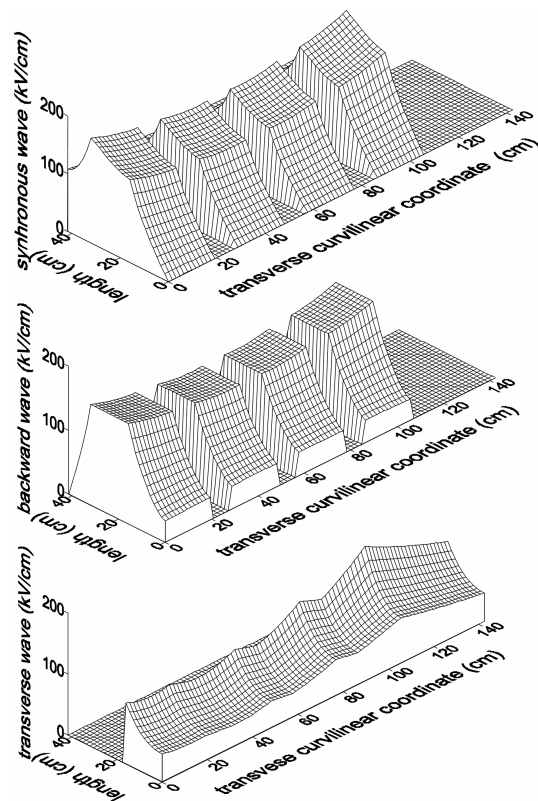


Рис. 3

Результат компьютерного моделирования процесса генерации излучения в таком четырехканальном генераторе представлен на рис. 3.

Моделирование проводилось с использованием усредненных уравнений, описывающих взаимодействие пучка с накапливаемыми в резонаторе колебаниями. Данная картина распределения амплитуды колебаний соответствует установившемуся одномодовому стационарному режиму генерации. Представленная картина распределения колебаний в четырехслойной электродинамической структуре устанавливается за вполне приемлемое время масштаба 300 нс и довольно слабо зависит от различия в параметрах электронных пучков в этих каналах.

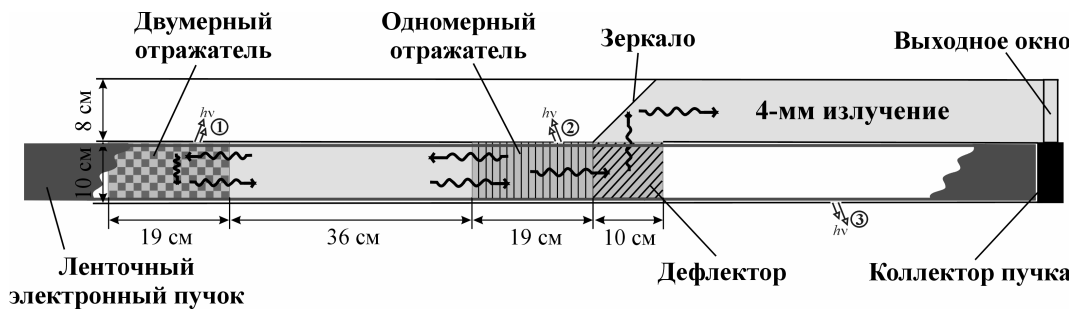


Рис. 4

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В серии недавних экспериментов, проведенных на установке ЭЛМИ в 2002 году, была исследована работоспособность планарного мазера, который является прообразом отдельного модуля 4-х канального МСЭ. Схема такого модельного эксперимента представлена на рис. 4. Ленточный электронный пучок, имеющий после формирователя сечение 0.4×7 см и ток до 3 кА, транспортировался в магнитном поле ондулятора внутри планарного резонатора. Поперечное магнитное поле ондулятора имело пространственный период 4 см и амплитуду до 2 кГс, продольное поле было практически однородно и имело напряженность до 14 кГс. Планарный резонатор, использованный в экспериментах, состоял из входного двумерного и выходного одномерного брэгговских отражателей, соединенных отрезком регулярного волновода сечением 0.95×10 см и длиной 36 см. Входной отражатель, составленный из двух одинаковых брэгговских решеток с шахматной нарезкой глубиной 0.2 мм, имел длину 19 см, а выходной с такой же длиной состоял из гладкой пластины и одномерной брэгговской решетки с глубиной нарезки 0.13 мм. За выходным отражателем резонатора располагался дефлектор волны, образованный двумя одномерными решетками длиной 10 см с прямоугольной нарезкой глубиной 0.3 мм, которая имеет наклон 45° к направлению движения выходящей из мазера волны. Генерируемая волна, распространявшаяся вместе с электронным пучком, рассеивалась на такой нарезке под углом 90° и выходила из области, занимаемой пучком. Далее выведенная с помощью дефлектора волна после отражения от зеркала распространялась в волноводе прямоугольного сечения и выводилась через тонкопленочное окно в атмосферу. В свою очередь, электронный пучок после прохождения резонатора транспортировался по выходной части канала к графитовому коллектору, который отстоял от резонатора на значительном (~ 0.5 м) расстоянии с тем, чтобы увеличить время задержки прихода плазмы от коллектора в резонатор.

Проведенные исследования показывают высокую эффективность рассеивания исходной волны H_{10} в поперечное направление на гофрированной поверхности дефлектора. Так для

трансформатора волн с геометрией, описанной выше, коэффициент трансформации по мощности на резонансной частоте 75,2 ГГц достигает 65%. Ширина полосы резонансного рассеяния составляет при этом $\sim 2..2,5$ ГГц и полностью перекрывает спектр собственных частот планарного резонатора установки ЭЛМИ. Как показывают расчеты, проведенные в рамках модели связанных волн, свойства дефлектора могут быть значительно улучшены выбором специальной геометрии гофрированной области. В результате оптимизации формы гофрированной области можно существенно повысить коэффициент трансформации, а также создавать различные распределения электрического поля на выходе такого дефлектора (в том числе синусоидальное распределение, близкое к структуре H_{10} волны) и тем самым согласовывать данное устройство либо с открытым пространством, либо с волноводом прямоугольного сечения.

В данной серии экспериментов измерялись локальная мощность миллиметрового излучения с помощью детекторов на горячих носителях с заперделными волноводами и диаграмма направленности излучения по свечению табло из неоновых ламп. Кроме того, с помощью набора световодов и ФЭУ регистрировалось оптическое излучение (обозначено на рис. 4 символом $h\nu$) из нескольких точек по длине резонатора, а также из дефлектора и выходной части канала, по которой электронный пучок транспортировался до принимающего коллектора.

Результаты измерений, полученные в типичном выстреле, в котором амплитуда ондуляторного поля была 0.7 кГс, а величина ведущего - 12 кГс, представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, характер зависимости сигналов мощности излучения вблизи 75 ГГц ($P_{4\text{мм}}$) имеет форму пика с длительностью около 300...400 нс, при длительности электронного пучка более 2-х микросекунд. В сравнении с предыдущими сериями экспериментов, применение дефлектора волн и удаленность коллектора пучка позволили несколько увеличить длительность импульса излучения. Сигналы, характеризующие оптическое излучение из выходного канала (см. осциллограмму 3 на нижней части рис. 5) и выходного отражателя резонатора (сигнал 2) резко нарастают во время и после окончания импульса излучения, в то время как свет из входного отражателя (сигнал 1)

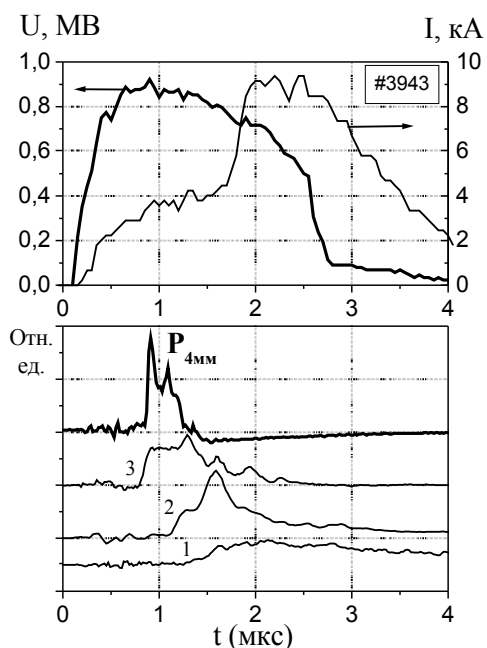


Рис. 5

нарастает значительно позднее. Таким образом, возрастание мощности миллиметрового излучения приводит к возникновению СВЧ-пробоя и быстрому движению плазмы от коллектора пучка к резонатору и, в конечном итоге, к прекращению генерации излучения.

Регистрация с помощью панели из неоновых ламп пространственного распределения мощности в выходящем из генератора мм-излучении показала, что оно соответствует волне H_{10} в планарном волноводе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали адекватность планарных мазеров задаче получения большой мощности и достижения большого энергозапаса в импульсах когерентного миллиметрового излучения. При этом достижение гигаватного уровня мощности при микросекундной длительности импульса возможно как в единичном модуле с шириной канала масштаба одного метра, так и в многоканальной схеме при ширине каждого из каналов масштаба 15...20 см. В том и другом случаях пространственная когерентность излучения во всем сечении электромагнитного потока может быть обеспечена за счет использования пространственно распределенных обратных связей, которые реализуются при рассеянии попутной с электронным пучком волны на брэгговских решетках с двумерной гофрировкой поверхности. Вариант планарного генератора по многоканальной схеме представляется более приемлемым с точки

зрения технического воплощения магнитной и электродинамической систем. С другой стороны, это требует дополнительных исследований возможности параллельной генерации большого числа ленточных пучков и возможности достижения синхронизма между колебаниями в параллельно накачиваемых каналах.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, M.V. Yushkov // *Twelfth Inter. Free Electron Laser Conf.* Paris, France, 1990, Program and Abstr., p. 105.
2. А.В. Аржанников, С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков. *Препринт ИЯФ 91-85.* Новосибирск, 1991.
3. A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, V.S. Nikolaev et al. // *14-th Intern. FEL Conference.* Kobe, Japan, 1992. Technical Digest, p. 214.
4. A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, N.Yu. Peskov et al. // *II Intern. Workshop "Strong microwaves plasmas"*, Nizhny Novgorod, 1993, Abstr., p. S-25.
5. А.В. Аржанников, М.П. Лямзин, С.Л. Сеницкий и др. // *International Conf. on Plasma Physics.* New Delhi, India, 1989, p. 961.
6. A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, V.A. Kapitonov et al. // *Proc. of the 9 Inter. Conf. on High-Power Particle Beams.* Novosibirsk, USSR, 1990, vol. 1, p. 256.
7. A.V. Arzhannikov, V.B. Bobylev, V.S. Koidan et al. // *Transactions of Fusion Technology.* 1999, vol. 35, N 1T, p. 136.
8. A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, N.Yu. Peskov et al. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 1995, v. 358, pp. 189-192.
9. А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов и др. // *Письма в ЖТФ.* 2000, т. 26, вып. 8. с. 72-83.
10. Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев и др. // *Известия вузов: Радиофизика.* 2001, т. XLIV, № 5-6, с. 533-553.
11. N.V. Agarin, A.V. Arzhannikov, V.B. Bobylev et al. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 2000, v. 445, pp. 222-229.
12. А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, П.В. Калинин и др. // *Тезисы докладов XXVIII-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС.* Звенигород, 2001, с. 168.
13. Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев и др. // *Письма в ЖТФ.* 2001, т. 27, № 6, с. 50-58.
14. N.S. Ginzburg, N.Yu. Peskov, A.S. Sergeev et al. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 2001, v. 475, pp. 173-177.
15. В.Т. Астрелин, В.Я. Иванов // *Автометрия.* 1980, т. 3, с. 92-99.
16. I.S. Gradshtein, and I.M. Ryzhik. *Handbook of Integrals, Sums, Series, and Products.* M.:Fizmatgiz, 1962.