



УДК 621.318.3, 621.373.826

С. А. Марцынюков, Д. К. Кострин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ"

## Моделирование, разработка и исследование электромагнитной системы для управления мощностью лазера на углекислом газе

*Предложен метод электромагнитного управления мощностью лазера на углекислом газе. Выполнены моделирование и расчет магнитного поля в рабочем зазоре электромагнитной системы. Описаны экспериментальные исследования по распределению магнитной индукции в месте расположения активного элемента лазера на углекислом газе.*

### Электромагнитная система управления, лазер на углекислом газе, поперечное магнитное поле

Лазерные технологии используются в различных технологических областях. Из существующих лазеров наибольший интерес представляет имеющий широчайшее применение углекислотный лазер ( $\text{CO}_2$ -лазер), с помощью которого можно проводить как резку стекла и сварку металлов [1], так и медицинские операции в косметологии и стоматологии [2]. Углекислотные лазеры могут иметь очень большую мощность – до десятков киловатт в непрерывном режиме. Преимущества импульсного режима работы технологического  $\text{CO}_2$ -лазера обусловлены нестационарностью протекающих процессов накачки и генерации. При этом требуется как плавное изменение мощности, так и формирование импульса с заданными амплитудой и формой с временным разрешением порядка 1 мс [3].

Существующие способы управления мощностью  $\text{CO}_2$ -лазера далеко не оптимальны, что в значительной мере затрудняет их применение. Модуляция мощности [4] может осуществляться с помощью:

– механических модуляторов, характеризующихся простотой и надежностью, но не позволяющих плавно изменять форму, длительность импульса и среднюю мощность;

– электрооптических модуляторов, обладающих малой инерционностью, но нестойких к повреждениям, использующим кристаллы с малой лучевой стойкостью и к тому же весьма дорогих;

– акустооптических модуляторов, характеризующихся малой лучевой стойкостью кристалла и большой инерционностью;

– модуляторов тока лазера.

Последние модуляторы достаточно распространены, не требуют дополнительных оптических элементов, что в целом упрощает лазерную установку. Однако при существенном изменении тока лазера возникает колебательный процесс установки когерентной мощности  $\text{CO}_2$ -лазера, обусловленный изменением температуры резонатора и изменением состава газовой смеси.

Для устранения данных недостатков целесообразно использовать электромагнитную модуляцию. При этом для модуляции мощности  $\text{CO}_2$ -лазера используется поперечное магнитное поле [5], [6]. Электромагнитный метод модуляции основывается на плазменно-оптическом эффекте, который обусловлен взаимодействием магнитного поля с активной средой лазера. Этот метод позволяет управлять выходной мощностью лазера непрерывного действия, меняя ее значение от максимального до нулевого по линейному закону при достаточном быстродействии.

В отпаянных газоразрядных лазерах среднего давления действие поперечного магнитного поля на выходную мощность обусловлено изменением зоны взаимодействия активной среды с полем резонатора и током разряда, при этом с ростом индукции магнитного поля эти величины уменьшаются. Быстро-

действие магнитного управления  $\text{CO}_2$ -лазера определяется временем перемещения плазмы внутри трубки, временем нарастания магнитного поля, временем жизни возбужденных молекул и временем установления излучения в резонаторе.

При работе  $\text{CO}_2$ -лазера, управляемого поперечным магнитным полем в динамическом режиме, временное отставание выходной мощности излучения лазера относительно входного сигнала (тока катушки управления, когда для создания магнитного поля применяется система электромагнитов) зависит от следующих основных факторов:

- инерционности нарастания индукции магнитного поля;
- конечного времени перемещения разряда в магнитном поле.

Так как строгий теоретический анализ разрабатываемой системы электромагнитного управления весьма сложен, наиболее целесообразным представляется ее моделирование с помощью специальных программ с последующим экспериментальным исследованием электромагнитного управления мощностью.

При магнитном управлении разрядом необходимо определить геометрию магнитопровода и рассчитать параметры схемы включения катушек электромагнитов. Меняя геометрию полюсных наконечников, можно менять площадь поперечного сечения рабочего зазора в зоне управления. Увеличение данной площади снижает среднюю индукцию магнитного поля в рабочем зазоре, но при этом магнитное поле становится более однородным и падает доля поля, теряемая за счет рассеяния.

Расчет распределения магнитного поля в рабочем зазоре выполнен в программном пакете FlexPDE – программе, предназначенной для по-

строения сценарных моделей решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. В программе производится преобразование описания системы дифференциальных уравнений в частных производных в модель для расчета методом конечных элементов, решение этой системы и представление результатов в графической форме.

Первым этапом моделирования явилась оценка однородности магнитного поля в рабочем зазоре при применении от одного до семи электромагнитов (ограничение на максимальное количество электромагнитов, равное семи, связано с размерами трубки лазера). Предлагаемые для применения в разрабатываемой системе катушки электромагнитов имеют каркас из органического стекла толщиной 5 мм для предотвращения пробоя, на который намотана изолированная проволока диаметром 1.5 мм. Катушка состоит из девяти слоев и 23 витков в каждом слое. На рис. 1 приведены графики распределения индукции магнитного поля  $B$  вдоль трубки лазера для системы из одного (рис. 1, а), трех (рис. 1, б) и семи (рис. 1, в) электромагнитов соответственно. Координата  $x$  отображает смещение по продольной оси трубки лазера от ее центра.

По мере увеличения числа магнитов возрастает равномерность магнитного поля вдоль трубки лазера, при этом уменьшается максимальное значение индукции. Очевидно, что равномерность магнитного поля даже при применении семи электромагнитов (рис. 1, в) неудовлетворительна и такая система не подходит для управления мощностью лазера.

Для устранения неоднородности магнитного поля может быть использован выравниватель – устройство, позволяющее выравнивать значение магнитной индукции вдоль лазерной трубки. Выравниватель представляет собой склеенные пла-

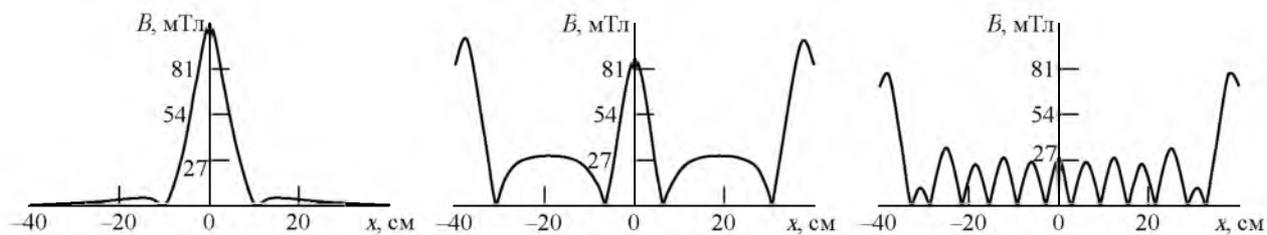


Рис. 1

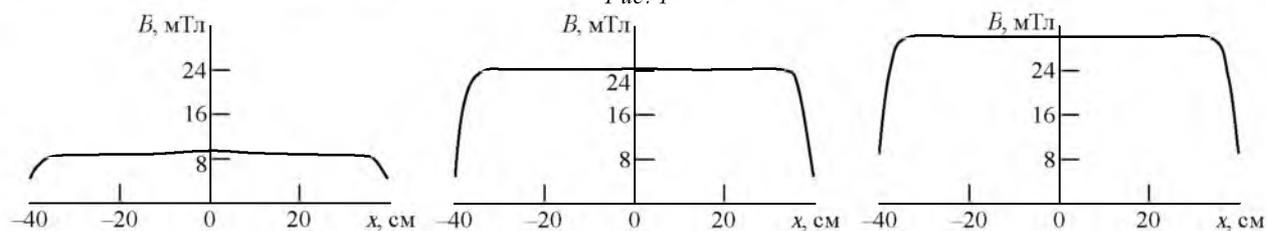


Рис. 2

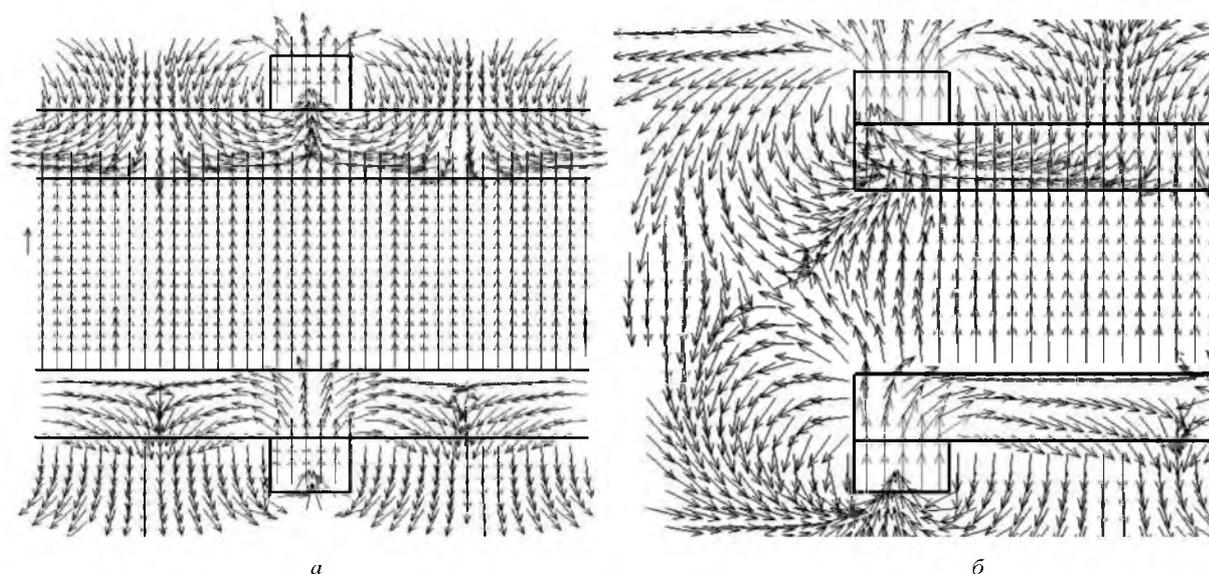


Рис. 3

стины трансформаторного железа, расположенные с обеих сторон вдоль трубки лазера между ней и полюсами электромагнитов. Применительно к рассмотренному лазеру выравниватель выполнен из пластин с размерами  $80 \times 3$  см. Толщина каждого из набора пластин составила 2 см. Необходимо отметить, что на полученный результат влияли размеры пластин, толщина набора выбиралась из конструктивных соображений.

На рис. 2, *a*, *b* и *в* приведены распределения, аналогичные распределениям на рис. 1, для системы из выравнивателя и одного, трех и семи электромагнитов соответственно. Применение выравнивателя позволяет выровнять магнитное поле даже при использовании одного электромагнита (рис. 2, *a*). Однако по мере увеличения числа магнитов происходит дополнительное выравнивание распределения поля вдоль трубки лазера, а также увеличение значения магнитной индукции.

Программа FlexPDE позволяет не только рассчитать распределение индукции магнитного поля, но и получить картины распределения магнитного поля в разрабатываемой системе. Результаты расчета такого распределения в центральной части рабочего зазора и на краю электромагнитной системы представлены на рис. 3, *a* и *б* соответственно.

По результатам моделирования разработан и собран макет электромагнитной системы управления углекислотным лазером (рис. 4). Конструкция электромагнитной модуляции излучения  $\text{CO}_2$ -лазера защищена двумя патентами на полезную модель [7], [8]. Однако прежде чем приступить к экспериментам с лазером, следует экспериментально проверить полученные с помощью программного моделирования картины магнитного поля.

Измерения магнитной индукции проводилось с помощью миллитесламетра МПУ-1. Методика измерения была следующей: пространство между



Рис. 4

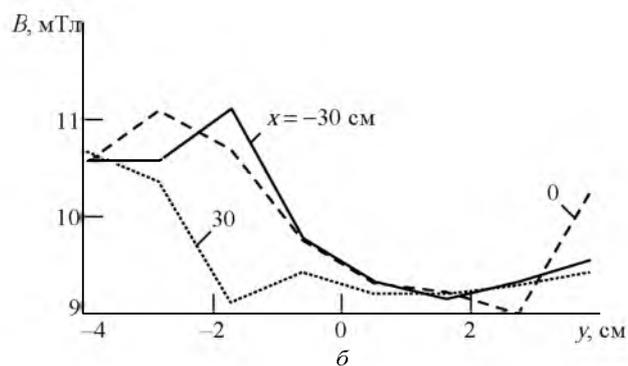
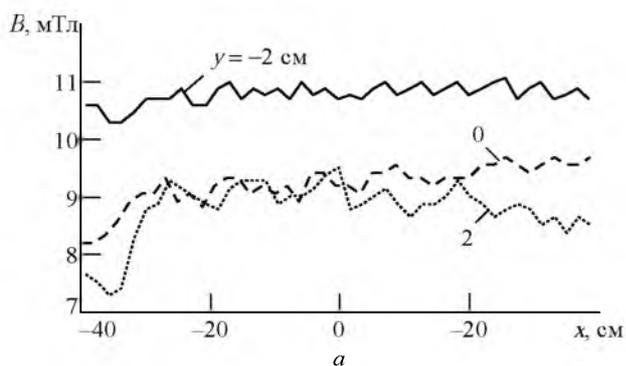


Рис. 5

выравнивателями разбивалось на ячейки  $10 \times 10$  мм. В точках пересечения линий сетки производился замер индукции магнитного поля. Измерения проводились при токе электромагнитов  $I = 5$  А для продольной и для поперечной составляющих магнитной индукции. На рис. 5, а приведена зависимость продольной составляющей магнитной индукции при различном расстоянии  $y$  от центра системы в поперечной плоскости. На рис. 5, б показано распределение поперечной составляющей индукции магнитного поля при различном расстоянии от центра системы в продольной плоскости.

Исходя из приведенных графиков, можно сделать вывод о равномерности распределения магнитного поля в разработанной системе как в продольном, так и в поперечном сечениях.

Дополнительный интерес представляет исследование зависимости индукции магнитного поля от рабочего тока катушек электромагнитов. На рис. 6 приведены зависимости продольной составляющей магнитной индукции при разных токах электромагнитов.

По результатам исследования разработанной электромагнитной системы для управления мощностью  $\text{CO}_2$ -лазера можно сделать следующие выводы:

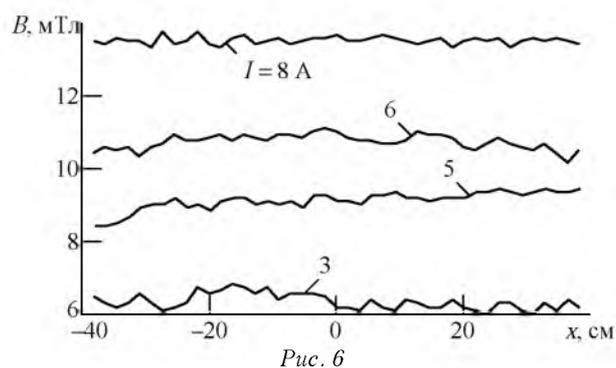


Рис. 6

– с возрастанием рабочего тока катушек электромагнитов индукция магнитного поля увеличивается практически по линейному закону;

– разброс значений магнитной индукции уменьшается по мере роста рабочего тока катушек электромагнитов (см. рис. 6);

– распределение магнитной индукции вдоль трубки лазера практически равномерно.

Таким образом, разработанная система позволяет за счет регулировки индукции внешнего магнитного поля изменять положение газового разряда внутри трубки лазера и тем самым управлять его мощностью, включая получение импульсов и их последовательностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаймарданов Р. Лазер  $\text{CO}_2$ : гибкое, надежное и испытанное средство // Фотоника. 2011. Т. 29, № 5. С. 16–19.
2. Тарасенко С. В., Позднякова Т. И., Степанов М. А. Применение лазерных технологий в комплексном лечении пациентов с плоским лишаем слизистой оболочки полости рта // Рос. стоматология. 2013. Т. 6, № 4. С. 38–44.
3. Импульсно-периодический  $\text{CO}_2$ -лазер с поперечным разрядом для хирургических применений / С. М. Никифоров, С. С. Алимпиев, Я. О. Симановский и др. // Биомед. радиоэлектроника. 2012. № 8. С. 72–76.
4. Елохин В. А., Жданов И. Г. Методы модуляции излучения  $\text{CO}_2$  лазеров // Науч. приборостроение. 2003. Т. 13, № 3. С. 46–51.
5. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Исследование инерционности перемещения плазмы под действием поперечного магнитного поля // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. "Физика твердого тела и электроника". 2004. № 2. С. 27–31.
6. Марцынюков С. А. Исследование влияния электромагнитного управления на условия существования разряда в лазере на углекислом газе // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 4. С. 13–17.

7. Пат. RU 125780 U1. МПК H01S3/10 (2006.01). Газо-разрядный CO<sub>2</sub>-лазер / В. В. Черниговский, С. А. Марцынюков. Опубл. 10.03.2013. Бюл. № 7.

8. Пат. RU 126206 U1. МПК H01S3/10 (2006.01). Газо-разрядный CO<sub>2</sub>-лазер / В. В. Черниговский, С. А. Марцынюков. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.

S. A. Martsinukov, D. K. Kostrin  
*Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"*

### **Modeling, designing and research of electromagnetic system for the power control of the carbon dioxide laser**

*The method of electromagnetic power control of carbon dioxide laser is offered. Modeling and calculation of a magnetic field in a working gap of electromagnetic system is carried out. Research of magnetic induction distribution in the location of an active element of the carbon dioxide laser is shown.*

Electromagnetic control system, carbon dioxide laser, cross magnetic field

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2014 г.

---