электронное научно-техническое издание
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. ISSN 1994-0408

Высокоэффективные источники накачки для импульсных полупроводниковых лазерных линеек

77-30569/373951

04, апрель 2012

Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В.

УДК.621.373.826

НИИ «Радиоэлектронной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана
mydusya@yandex.ru
fefalex@yandex.ru

В настоящее время развитие лазерной техники определяется во многом прогрессом в области совершенствования устройств лазерной диодной накачки. Особенно это коснулось направления твердотельных импульсно-периодических лазеров. Фактически сейчас разрабатываются и эксплуатируются два типа твердотельных лазеров: лазеры с ламповой накачкой активной среды и лазеры на основе диодной накачки. Области применения двух типов лазеров сначала были различными, но по мере совершенствования лазерных диодов, снижения их стоимости наблюдается интенсивный процесс замещения во всех сферах науки и техники лазеров с ламповой накачкой на более надежные и компактные лазеры с диодной накачкой, даже в мощных технологических системах. Критерий выбора схемы реализации лазерной установки заключается в минимизации массогабаритных параметров и требований к питающей сети.

В связи с бурным ростом доли лазеров с диодной накачкой в лазерной технике разработка надежных источников питания (ИП) полупроводниковых лазеров является одной из актуальных задач современной лазерной техники. Источники питания для систем ламповой накачки изучены и описаны достаточно подробно [1, 2]. Поэтому рассмотрим основные аспекты проектирования импульсных источников питания мощных полупроводниковых лазерных линеек.

Отметим несколько отличительных особенностей ИП для диодной накачки. Во-первых, ширина линии накачки активных элементов и ширина линии излучения лазерных диодов достаточно узки, возникает проблема их согласования для достижения максимальной эффективности накачки. Частота линии излучения лазерных диодов сильно зависит от температуры, что и используется для ее управления. Поэтому, как правило, ИП включают в себя каналы стабилизации температуры линеек. Во-вторых, лазерные диоды в отличие от ламп не выдерживают обратных выбросов тока по заднему фронту импульса. От источников питания требуется повышение стабильности параметров выходных импульсов. Кратковременное превышение допустимого тока приводит к разрушению структуры. Также для улучшения работы лазерных диодов накачки требуется постоянный ток подставки.

Разработанный источник питания функционально состоит из четырех блоков: блок питания лазерных линеек, блок стабилизации температуры линеек, блок управления, блок питания. С помощью блока управления выбирается режим работы и формируется задающий импульс, который поступает на все каналы питания лазерных линеек. Блок питания лазерных линеек формирует импульс тока, подаваемый на лазерную сборку, состоящую из диодной линейки, элемента Пельтье и датчика температуры. При подаче на сборку импульса тока происходит ее нагрев, что приводит к появлению сигнала рассогласования по температуре, который блок стабилизации температуры линеек стремится свести к нулю.

Блок питания формирует все необходимые напряжения для питания схем управления. Схемы вспомогательного питания на основе DC-DC преобразователя напряжения используют питание 27 В. Две силовые ячейки мощностью 1 кВт на основе DC-DC преобразователя напряжения имеют питание 27 В и обеспечивают работу регулируемых стабилизаторов тока и схем стабилизации температуры.

Блок питания диодных линеек разработан на основе регулируемого стабилизатора тока, работающего в импульсном режиме. Ключевой транзистор VT1 запускается с помощью DA1 импульсом заданной длительности, сформированным управляющим модулем. Ток в нагрузке Rн контролируется схемой слежения на транзисторе VT2 и операционном усилителе DA2. При коротком замыкании в нагрузке транзистор VT2 закрывается и отключает силовой ключ от его питания (рис. 1).

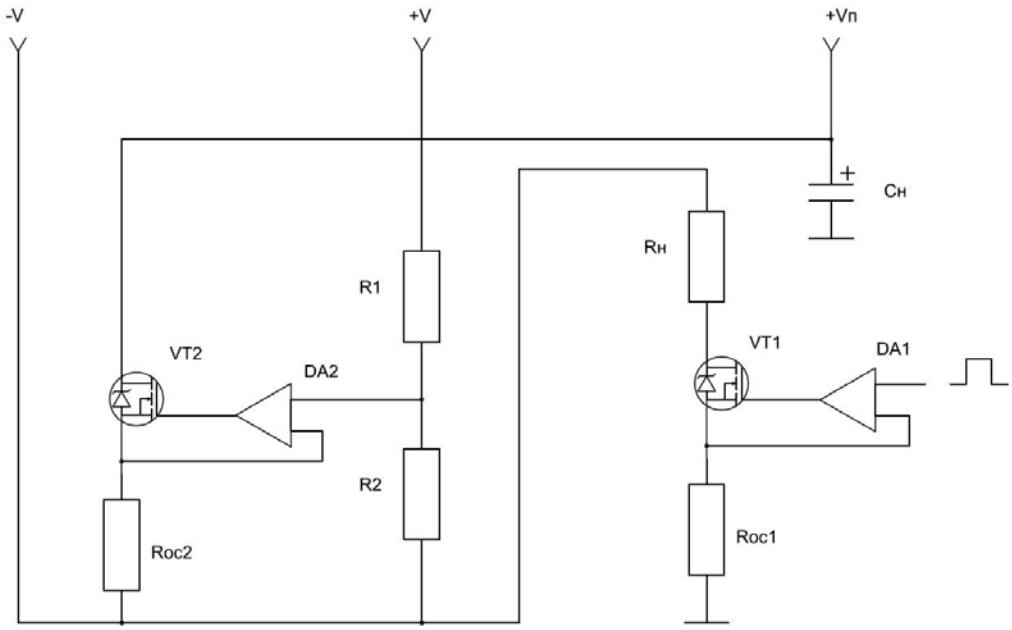

Рис. 1. Схема регулируемого стабилизатора тока.

Особенностью блока питания линеек является то, что он должен формировать качественные импульсы тока накачки при высоких значениях амплитуды тока (200 А и более). Как известно, каждый проводник обладает распределенными параметрами (индуктивность, емкость). При больших требуемых амплитудах импульсного тока и достаточно крутых фронтах схема может начать «звенеть» и возбуждаться. Это приводит

не только к нестабильности накачки, но и к превышению максимально допустимой амплитуды импульсов тока и к появлению обратных выбросов. Для исключения этого эффекта необходимо уменьшать распределенные индуктивность и емкость схемы. Это может быть достигнуто минимизацией размеров проводников и самого блока питания, оптимальной компоновкой блока. Это трудная задача, т.к. мощная схема состоит из крупных элементов. Задача усложняется тем, что импульс тока накачки формируется по семи каналам, которые начинают влиять друг на друга. Кроме того кабель, подводящий импульс накачки к линейке, имеет большую длину и для уменьшения его паразитных параметров приходится использовать коаксиальную конструкцию.

Модуль стабилизации температуры лазерных линеек использует элементы Пельтье. Схема модуля состоит из двух частей – формирователя и мостовой схемы выходного каскада. Формирователь модуль управления элементами Пельтье реализован на базе процессора типа C8051F017, работающего от внутреннего кварцевого генератора с тактовой частотой 16 МГц. Объем ОЗУ микроконтроллера – более 2К. Модуль обеспечивает измерение температур термодатчика лазерной структуры и сравнение ее с температурой задатчика. Также модуль передает сигналы о готовности к включению и выходе в режим стабилизации температуры на модуль управления. На передней панели ИП имеются тумблеры для включения каналов стабилизации (1-7) при работе в автономном режиме. На основе управляющего алгоритма идет формирование ШИМ сигнала соответствующего знака для управления выходным каскадом, выполненным по мостовой схеме. Каждое плечо мостовой схемы управляется своим двухканальным драйвером типа IR2183 верхнего и нижнего транзистора. ШИМ-сигнал поступает либо на один, либо на другой драйвер, в зависимости от необходимости нагрева или охлаждения лазерной линейки. Каждый драйвер имеет встроенную защиту от одновременного открывания верхнего и нижнего транзистора плеча и обеспечивает паузу 0,5 мкс между их работой, что предотвращает возникновение сквозных токов и режима короткого замыкания при возможных сбоях системы управления, когда одновременно работают оба плеча моста. Для уменьшения амплитуды в режиме малой мощности и для плавной регулировки тока на выходе моста предусмотрены сглаживающие индуктивности. Отметим, что разработанный регулятор является универсальным, т.е. способен работать автономно при подаче сигнала рассогласования.

К стабилизаторам тока элемента Пельтье предъявлялись следующие требования:

1. Количество параллельно соединяемых элементов в секции: от 1 до 7.
2. Диапазон изменения тока элемента в секции: 0,0-3,5 А. (× 7 шт.)
3. Напряжение элемента: 3,6 В × 7 шт.
4. Диапазон рабочих температур: 25 – 50 °С.
5. Нестабильность температуры и шаг установки: 0,1 °С.
6. Сопротивление измерительного NTC термистора: 10 КОм±1 %.

Принцип управления или алгоритм работы модуля основан на автоматическом регулировании управляющего напряжения элемента Пельтье. Наиболее часто в задачах АСУ применяются двухпозиционное регулирование или пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование.

Сначала был разработан двухпороговый двухпозиционный алгоритм регулирования, который обеспечивает включение или отключение исполнительного

устройства в зависимости от уровня рассогласования. В результате удалось добиться устойчивой работы лазера на частотах до 10 Гц. При повышении частоты увеличивалась мощность, рассеиваемая стабилизаторами, и температура структур выходила за пределы заданной.

При ПИД регулировании сигнал управления зависит от разницы между измеренным и заданным значением (пропорциональная компонента), от интеграла от разности (интегральная компонента) и от скорости изменения параметров (дифференциальная компонента). После настройки пропорциональной компоненты получается переходная характеристика с переколебаниями. Интегральная компонента убирает остаточное рассогласование между установившимся в системе значением температуры и уставкой. Далее настраивается дифференциальная компонента, которая устраняет затухающие колебания и делает переходную характеристику плавно стремящейся к уставке. В результате ПИД регулятор обеспечивает такое состояние исполнительного устройства, при котором измеренный параметр равен заданному значению. Поскольку состояние исполнительного устройства стабилизируется, точность поддержания параметра в системе повышается. Качество управления, обеспечиваемое ПИД регулятором, определяется степенью соответствия выбранных параметров регулятора свойствам системы.

Разработанный алгоритм ПИД регулирования позволил поднять точность управления в несколько раз по сравнению с двухпозиционным регулятором, благодаря чему удалось добиться устойчивой генерации лазера на частотах от 30 до 50 Гц при максимально возможной длительности импульса излучения.

Микропроцессорный блок управления источником питания состоит из трех модулей: ведущий модуль управления, модуль блокировки и модули управления Пельтье (7 каналов). Общим для всех трех модулей является использование 8-битных процессоров (ЦП) типа C8051Fxxx фирмы Silabs (США). Наличие у процессора встроенных АЦП и ЦАП упрощает регулирование выходных сигналов. Для формирования и контроля временных интервалов или ШИМ-последовательностей процессоры имеют до пяти программируемых таймеров с модулями захвата и сравнения. Особо отметим наличие удобного интерфейса для программирования процессора.

Семиканальный модуль управления реализован на базе процессора типа C8051F122, работающего от внешнего кварцевого генератора с тактовой частотой 24 МГц. Наличие системы ФАПЧ позволяет увеличить частоту работы процессора до 100 МГц. Объем ОЗУ микроконтроллера – более 8К. Модуль управления способен работать в автономном (ручном) и дистанционном режиме. Модуль обеспечивает выполнение ряда основных функций:

1) формирование синхроимпульсов строба и задержек;
2) формирование выходного импульса регулируемой длительности с помощью ЦАП;
3) формирование шины И2С (внутренний интерфейс) и обмен информацией с внешним модулем блокировок;
4) формирование дифференциальных сигналов полудуплексного интерфейса RS-485 для обмена информацией с компьютером (дистанционный режим);

5) мгновенная блокировка ИП в случае получения соответствующего сигнала от модуля блокировок;
6) сохранение основных параметров режимов работы во внутренней флэш-памяти микроконтроллера, а также учет наработки ИП;
7) отображение информации об основных параметрах ИП и блокировках с помощью 4-х строчного символьного индикатора (ЖКИ 4*20 знаков) типа AC204 (Ampire).

ИП разрабатывался специально для работы в составе автоматизированного лазерного стенда, поэтому в качестве интерфейса выбран интерфейс RS-485. Для передачи данных был разработан протокол, основанный на передаче последовательности байтов – начинающийся с номера команды и заканчивающийся кодом 0xFF. Для удобства команды были разделены на команды записи и чтения.

Наличие функции внешнего запуска позволяет использовать разработанную модель ИП для мощных лазерных установок, которые обычно работают по схеме задающий генератор – каскадный усилитель. Время реакции источника питания на внешний запуск не более 1 мкс.

Общий ток потребления схемы составляет не более 250 мА с учетом подсветки ЖКИ. Ток потребления по питанию 3 В не превышает 30 мА.

Модуль блокировок предназначен для формирования сигналов мгновенной и штатной блокировки. Работа ИП возможна только при устранении всех штатных блокировок. Модуль блокировок реализован на базе более простого процессора типа C8051F023, работающего от внешнего кварцевого генератора с тактовой частотой 24 МГц. Объем ОЗУ микроконтроллера – более 4 Кбит. Необходимость применения такого модуля была продиктована слишком большим количеством контролируемых параметров. Модуль обеспечивает измерение напряжения питания транзисторного силового ключа и напряжение в нагрузке, обрабатывает сигналы готовности от силовых каналов и каналов стабилизации элементов Пельтье. По запросу от ведущего модуля формируется транзакция на шине И2С с текущим кодом состояния всех блокировок по 7 каналам. В случае срабатывания одной из блокировок во время работы ИП в режиме формирования импульсов накачки экстренный останов блока происходит с помощью функции мгновенной блокировки. При этом выходной драйвер схемы формирует спадающий фронт, который подается на вход внешнего прерывания управляющего модуля. Длительность реакции управляющего модуля на такую блокировку составляет несколько мкс, что позволяет безопасно обесточить лазерную структуру.

Конструкция блока питания лазерных диодных линеек выполнена с учетом минимизации массогабаритных параметров и требований электромагнитной совместимости. Блок конструктивно разделен на четыре секции для эффекта максимального экранирования. Две внутренние секции находятся в зоне принудительного обдува. Вентиляторы расположены на боковых стенках корпуса. В первой секции рядом с передней панелью располагаются модуль управления и блокировок. Далее расположена секция с двумя источниками силового питания. В отдельной секции находятся платы стабилизации элементов Пельтье. Мощные стабилизаторы тока расположены у задней панели для удобства крепления силовых разъемов и минимизации длины проводов.

Органы управления ИП и ЖКИ расположены на передней панели блока. Каждый канал имеет световую индикацию для стабилизатора тока и модуля управления элементом Пельтье. Имеется отдельный тумблер включения мощности. На задней панели блока расположены силовые разъемы, разъемы синхросигналов и разъем питания.

Разработанный многоканальный импульсно-периодический источник накачки лазерных линеек формирует импульсы тока с частотой до 50 Гц и длительностью (60-500) мкс.

Количество каналов накачки – от 1 до 7.

Рабочий ток лазерных диодов - до 250 А.

Нестабильность тока от импульса к импульсу - не более 0,5 %.

Наличие регулируемых каналов стабилизации температуры лазерных диодных линеек, набор защитных функций (аппаратных и программных), модульная компоновка блока позволяют повысить надежность источника накачки. Источник накачки мобилен и работает от двух аккумуляторных батарей по 12 В. С учетом вышесказанного, данный источник накачки может быть использован для широкого круга задач в лазерной технике.

Разработанный источник накачки применялся для проведения экспериментов с новыми типами квантронов лазеров с полупроводниковой накачкой, разработанных в НИИ РЭТ. При этом преследовалась цель обеспечения заданных значений коэффициента усиления слабого сигнала (не менее 30 и 20 для активных элементов диаметром 6,3 мм и 8 мм, соответственно) при заданном профиле инверсной населенности по сечению активного элемента. Система охлаждения активного элемента и температурной стабилизации обеспечивала частоту следования импульсов накачки до 20 Гц.

В результате проведенных исследований были получены генерационные характеристики квантрона с активным элементом диаметром 6,3 мм во всех, кроме непрерывного, режимах работы лазера. В заключение, приведем основные результаты экспериментов:

- в режиме свободной генерации получена выходная энергия до 2,1 Дж. При этом отличие эффективности генерации от предельно достижимой для используемой схемы накачки находится в пределах погрешности измерений;
- в режиме модуляции добротности получен импульс излучения длительностью 7-8 нс энергией до 200 мДж (при частоте следования импульсов до 50 Гц) и расходимостью 0,4 мрад (в диапазоне частот до 20 Гц). В данном режиме энергетические возможности квантрона полностью не используются, а уровень выходной энергии ограничен лучевой стойкостью активного элемента;
- в режиме усиления слабого сигнала достигнут коэффициент усиления (60..70) на оси активного элемента;
- в режиме многопроходного усиления при возбуждении усилителя от микрочип-лазера получен импульс субнаносекундной длительности с выходной энергией 150 мДж и дифракционным качеством выходного пучка излучения. Это позволило обеспечить эффективность преобразования во вторую, третью и четвертую гармоники лазерного излучения на уровне 70, 50 и 40 %, соответственно.

Список использованных источников:

1. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. - Москва: Сов. радио, 1980.- 104 с.
2. Грамаков А.А., Фефелов А.П., Чернышев А.В. Высокоэффективные источники накачки для непрерывных твердотельных лазеров. / "Лазерные системы и их применение", Сборник научных трудов, Москва, 2004, с. 45-46.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

High efficient pumping sources for pulse semiconductor laser bars

77-30569/373951

04, April 2012

Gramakov A.A., Fefelov A.P., Chernyshev A.V.

Bauman Moscow State Technical University
mydusya@yandex.ru
fefalex@yandex.ru

Nowadays progress in laser technology is determined by the progress in laser diode pumping. Modern power supply for diode lasers must provide stable output impulses, suppress reverse current surges and maintain stable temperatures of diode arrays. Inter-channel interference and noise immunity problems arising during generation of current impulses were solved. An automated laser test bench was developed; it included a special microprocessor-based circuit to control operation of the pumping source. A scheme of a temperature maintenance channel was developed along with s special regulation algorithm, which allowed to stable laser radiation at frequencies from 30 to 50 Hz with the longest possible impulse lengths. The developed multi-channel pulse-periodic pumping source for diode bars generates current impulses with frequencies up to 50 Hz and durations between 60 and 500 microseconds. The running current of laser diodes can be as high as 250 Amps. Instability of current from impulse to impulse is lower than 0,5 %. Several implemented protection features (both hardware- and software-based) along with modular design increase reliability of the pumping source. The pumping source was used to conduct experimental researches of new laser quantrons with semiconductor pumping developed at The Radio-electronic Technology Research Institute. The latter experiments resulted in some unique findings.

Publications with keywords: power supply, pumping source, semiconductor pumping, laser diode bar
Publications with words: power supply, pumping source, semiconductor pumping, laser diode bar

References

1. Vakulenko V.M., Ivanov L.P. *Istochniki pitaniia lazerov* [Power sources of lasers]. Moscow, Sovetskoe radio, 1980.104 p.

2. Gramakov A.A., Fefelov A.P., Chernyshev A.V. Vysokoeffektivnye istochniki nakachki dlia nepreryvnykh tverdotel'nykh lazerov [Highly efficient sources of pumping for continuous solid-state lasers]. *Lazernye sistemy i ikh primenenie: sbornik nauchnykh trudov* [Laser systems and their application: A collection of scientific papers]. Moscow, 2004, pp. 45-46.