

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ФРОНТА ТОКА НАКАЧКИ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Е. В. Смолина

УДК 621.373.8

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-709-713>

Институт лазерной физики СО Российской АН,
Новосибирск, Россия; e-mail: e.smolina@inbox.ru

(Поступила 8 июня 2022)

Показано, что для надежной работы матриц лазерных диодов важно обеспечить максимально допустимую, но не приводящую к их разрушению скорость ввода и вывода тока. Представлены решения, применяющиеся в конструкциях драйверов лазерных диодов с целью ограничения скорости нарастания при вводе и выводе тока. Предложен метод контроля скорости нарастания тока лазерного излучателя, суть которого заключается в формировании переднего и заднего фронтов выходного тока лазерного драйвера таким образом, чтобы его первая и как минимум вторая производная были непрерывны во избежание запуска внутренних механизмов, приводящих к деградации структуры излучателя.

Ключевые слова: матрицы лазерных диодов, драйвер лазерного диода, фильтр Баттерворта, фильтр Саллена—Ки.

It is shown that for reliable operation of laser diode matrices, it is important to ensure the maximum allowable, but not leading to their destruction, current input and output rate. Some of the solutions used in the design of laser diode drivers are listed in order to limit the increase in the rate of current input and output. A method for controlling the rate of rise of the laser emitter current is proposed, the essence of which is to form the leading and trailing edges of the output current of the laser driver so that its first and, at least, the second derivative are continuous, in order to avoid triggering internal mechanisms that lead to degradation of the emitter structure.

Keywords: laser diode arrays, laser diode driver, Butterworth filter, Sallen–Key filter.

Введение. Мощные импульсные лазерные диоды, линейки лазерных диодов и матрицы лазерных диодов широко применяются в современных оптоэлектронных устройствах [1, 2]. Важная задача обеспечения высокой надежности работы таких излучателей — формирование импульсов тока с плавным контуром, без коротких выбросов [3—7]. В работе [8] сообщается, что лазерные излучатели весьма чувствительны к отрицательному напряжению, которое может возникать на паразитных элементах токоведущей цепи при высокой скорости изменения тока. Согласно [3—8], для обеспечения высокой надежности работы лазерных излучателей важное значение имеет формирование импульсов тока плавной формы с контролируемой скоростью изменения тока. Как правило, данная задача решается путем снижения скорости нарастания тока в выходной цепи источника тока, токоведущей линии и лазерного излучателя, т. е. введением контроля скорости нарастания тока. Для осуществления контроля скорости нарастания тока в цепь источника тока вводятся реактивные элементы и ключи [8], новым является применение программного пошагового ввода тока с помощью мик-

MULTIELEMENT LASER'S PUMP CURRENT FRONT SHAPING METHOD

E. V. Smolina (Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; e-mail: e.smolina@inbox.ru)

** Доложено на 1-й международной конференции “Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе”, 23—27 мая 2022 г., Минск, Беларусь.

роконтроллера [9]. При этом эффективность таких решений невелика. Внесение шунтирующего конденсатора не оказывает влияния на скорость нарастания тока в излучателе из-за крайне малого дифференциального сопротивления полупроводникового излучателя. Добавление индуктивности позволяет контролировать скорость нарастания тока, но неизбежно приводит к забросу тока излучателя вследствие выхода оконечного каскада в режим насыщения. Так, в работе [10] показан метод повышения КПД источника тока, однако учет индуктивности токоподводящей линии отсутствует. Использование этого метода неизбежно приведет к насыщению выходного каскада источника на этапе ввода тока и, как следствие, забросу тока излучателя на этапе выхода каскада из насыщения.

При коммутации дистанционно-управляемого ключа, добавленного в конструкцию драйвера лазерного диода, достигается нечувствительность излучателя к процессам включения-выключения источника тока, однако при этом возникают резкие фронты напряжения и тока, опасные для излучателя.

Фронт импульса тока можно также формировать с помощью микроконтроллера, управляющего быстродействующим цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). При этом желаемая форма импульса тока аппроксимируется разбиением на большое число мелких шагов. Однако при переключении цифрового кода на входе ЦАП на его выходе возникает помеха коммутации, для устранения которой требуется введение дополнительных электронных компонентов, существенно ограничивающих быстродействие всей системы.

В настоящей работе исследованы характеристики источника тока лазерного излучателя, в схему которого введен фильтр низких частот (ФНЧ) второго порядка между каскадами задатчика и усилителя тока. Это позволяет управлять скоростью нарастания тока в лазерном излучателе и необходимо для устойчивой безопасной работы как самого лазерного излучателя, так и облучаемого его излучением объекта (активного элемента твердотельного лазера).

Анализ условий работы мощных импульсных источников тока свидетельствует о возможности организации контроля скорости нарастания тока через ограничение спектра частот задающего импульса на входе усилителя тока с помощью ФНЧ. В качестве прототипа ФНЧ использован фильтр Баттерворта [11], обладающий линейными амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками. Выбирая порядок и частоту среза фильтра, можно добиться формирования относительно гладких импульсов, которые, пройдя усилитель тока, обладают заданной скоростью нарастания тока и непрерывными производными, т. е. не имеют разрывов и изломов. Чем выше порядок фильтра, тем меньше время установления на заданную точность при одной и той же скорости нарастания тока. Данный подход позволяет реализовать режим контроля скорости нарастания фронтов импульса с заданным характеристическим временем нарастания сигнала и сформировать максимально гладкие (без выбросов и артефактов) импульсы тока для накачки лазерных излучателей. Такое решение может быть применено в отношении уже существующих источников тока, если они имеют вход аналогового управления током.

Методика эксперимента. Блок-схема источника тока накачки (ИТН) полупроводникового лазерного излучателя, реализующая предложенный метод контроля скорости нарастания тока, приведена на рис. 1. На ее основе разработаны и построены источники тока накачки лазерных линеек, один из которых — с полной шкалой тока 90 А, способный работать в непрерывном (CW) и импульсном режимах, другой — с полной шкалой тока 300 А в импульсном режиме. Оба источника существенно унифицированы по программным составляющим, аппаратным решениям и номенклатуре электронных компонентов.

При подаче питания от внешнего источника на ИТН узел усилителя мощности *б* удерживается в состоянии высокого выходного импеданса, ток на его выходе пренебрежимо мал, а программируемые элементы ИТН (регистры и конечные автоматы) находятся в случайном состоянии. Если напряжение внешнего источника в течение некоторого времени находится в заранее заданных пределах, то специальный аппаратный контроллер загрузки *12*, реализованный в ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема), считывает из энергонезависимой памяти конфигурационные данные и инициирует ими программируемые элементы ИТН. Далее в случае, когда данные имеют определенный признак, совпадающий с идентификатором платы, контроллер событий *13* переводит усилитель мощности *б* в номинальный режим сигналом *Z*, ИТН готов к работе. Контроллер событий *13*, реализованный в ПЛИС, отвечает за действия ИТН в реальном времени, принимает внешний сигнал Старт *S* (если используется), выдает сигнал управления аналоговым коммутатором *S1*, задавая характеристики времени импульса. Контроллер защиты *14* при обнаружении превышения допустимых мгновенных значений тока *I* или напряжения *U* на выходе усилителя мощности выдает сигнал, заканчи-

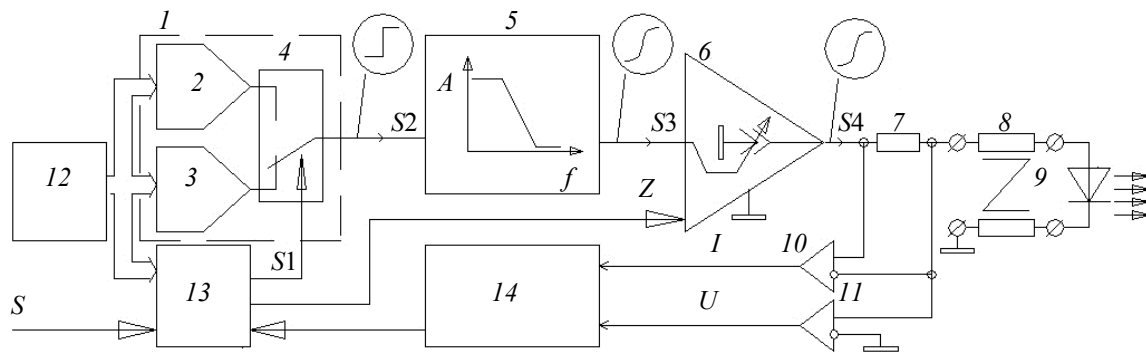


Рис. 1. Блок-схема лазерного драйвера с контролем скорости нарастания: 1 — датчик, 2 — ЦАП1, 3 — ЦАП2, 4 — коммутатор, 5 — ФНЧ, 6 — усилитель мощности, 7 — шунт-датчик тока, 8 — тоководящая линия, 9 — лазерный излучатель, 10, 11 — нормирующие усилители тока I , напряжения U , 12 — контроллер загрузки, 13 — контроллер событий, 14 — контроллер защиты; Z — управление высокоимпедансным режимом, S — сигнал Старт, $S1$ — сигнал уставки, сформированный по длительности, $S2$ — сигнал уставки, сформированный по амплитуде, $S3$ — сигнал уставки, сформированный по скорости нарастания, $S4$ — выходной ток с ограниченной скоростью нарастания

вающий текущее событие с признаком ошибки. Входящими данными для контроллера защиты 14 также являются условно не показанные на рис. 1 каналы контроля температуры, отраженной оптической мощности и др.

Задатчик 1 состоит из трех частей: ЦАП1 2, ЦАП2 3 и аналоговый коммутатор 4. В регистры ЦАП1 и ЦАП2 заносятся значения кодов, соответствующих начальному и номинальному токам излучателя. Обычно значение ЦАП2 устанавливается таким, чтобы обеспечить необходимый уровень оптической мощности на выходе излучателя, тогда как ЦАП1 устанавливается возле порогового тока излучателя из соображений минимизации перепадов температуры и/или быстродействия, либо возле нулевого значения для экономии энергии источника питания. В регистр ЦАП нельзя внести значение меньше некоторого выбранного, этим обеспечивается минимально необходимый начальный ток на выходе усилителя. Контроллер событий 13 выдает сигнал $S1$, управляя аналоговым коммутатором 4, задавая амплитуду и время импульса. Сигнал уставки $S2$ на выходе коммутатора 4 имеет форму ступеньки и сопровождается помехой коммутации. Например, использованный в ИТН стандартный аналоговый коммутатор ADG713 [12] имеет типовую длительность фронта импульса на выходе коммутатора ~ 1 нс, а амплитуда помехи коммутации достигает ± 3 В, что превышает размах используемого диапазона напряжений датчика. Напряжение сигнала уставки $S2$ на выходе коммутатора 4 с практической точки зрения испытывает разрыв, а его производные имеют неограниченные значения.

С выхода коммутатора сигнал уставки подается на вход ФНЧ 5 второго порядка. ФНЧ реализован по схеме Саллена—Ки [13] на прецизионном операционном усилителе с полевыми транзисторами на входе с единичным коэффициентом передачи. Для расчета номинальных величин элементов фильтра использованы методы [14, 15], численное моделирование проведено в программе LES (ИЯФ СО РАН). Данная структура фильтра может быть реализована при формировании фронтов в диапазоне от сотен миллисекунд до десятков наносекунд. ФНЧ Баттерворта преобразует сигнал уставки с резкими фронтами и неконтролируемой скоростью изменения в непрерывный гладкий так, что фронты $S3$ обладают заданной скоростью нарастания.

Узел усилителя мощности 6 выполнен в виде восьми параллельных секций на основе мощных полевых транзисторов. Каждая секция является законченным узлом с измерителем тока и усилителем обратной связи, что позволяет произвольно менять число секций при изменении требований на максимальный ток. Длительность собственного фронта секции ~ 1 мкс. Малая длительность собственного фронта необходима, чтобы переходные процессы, происходящие при включении-выключении внешнего питания, в том числе аварийные, не приводили к выбросам напряжения и тока в цепи тоководящей линии 8 и лазерного излучателя 9.

В качестве нагрузки ИТН использованы две последовательно включенные линейки лазерных излучателей с предельным током 80 А, подключенные с помощью токоведущей линии длиной 27 см.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные данные в виде осциллограмм сигналов в характерных точках зарегистрированы при отладке экземпляра драйвера с полной шкалой тока 90 А и соответствуют изменению тока в лазерном излучателе от 40 к 80 А. Осциллограмма выходного напряжения ФНЧ приведена на рис. 2, *а*. Сигнал зарегистрирован с помощью стандартного щупа 1:10, 10 МОм, 8 пФ осциллографом LeCroy с полосой пропускания 600 МГц. Видно, что изломы, разрывы и помехи коммутации отсутствуют. Фильтр обеспечивает гладкость и отсутствие выбросов как на краях, так и на всем протяжении переходного участка. Команда переключения коммутатора 4 задатчика с одного ЦАП на другой (рис. 1) отображена кривой *S1*. На рис. 2, *б* видно, как усилитель мощности вводит ток в соответствии с напряжением сигнала уставки *S3*. Осциллограмма снята с помощью специального шунта с подавленной индуктивностью и быстродействующего дифференциального приемника на основе ИС AD8130. Видно, что ток вводится гладко, без разрывов и заброса тока. Масштаб сигнала соответствует переходу тока от 40 к 80 А. На рис. 2, *в* приведена осциллограмма выходного напряжения ИТН. Колоколообразный импульс напряжения связан с “зарядкой” паразитной индуктивности токоведущей линии при изменении тока от 40 до 80 А, а более высокий уровень установившегося напряжения вызван падением напряжения на омическом сопротивлении линии. Следует отметить, что выбранный темп ввода тока близок к максимально возможному, когда не происходит насыщения силового каскада. При этом каскад питается от импульсного источника с напряжением 5 В, а на сборке лазерных линеек напряжение составляет 4 В, что показывает возможность обеспечивать высокий КПД устройства в линейном режиме, в данном случае ~80 %.

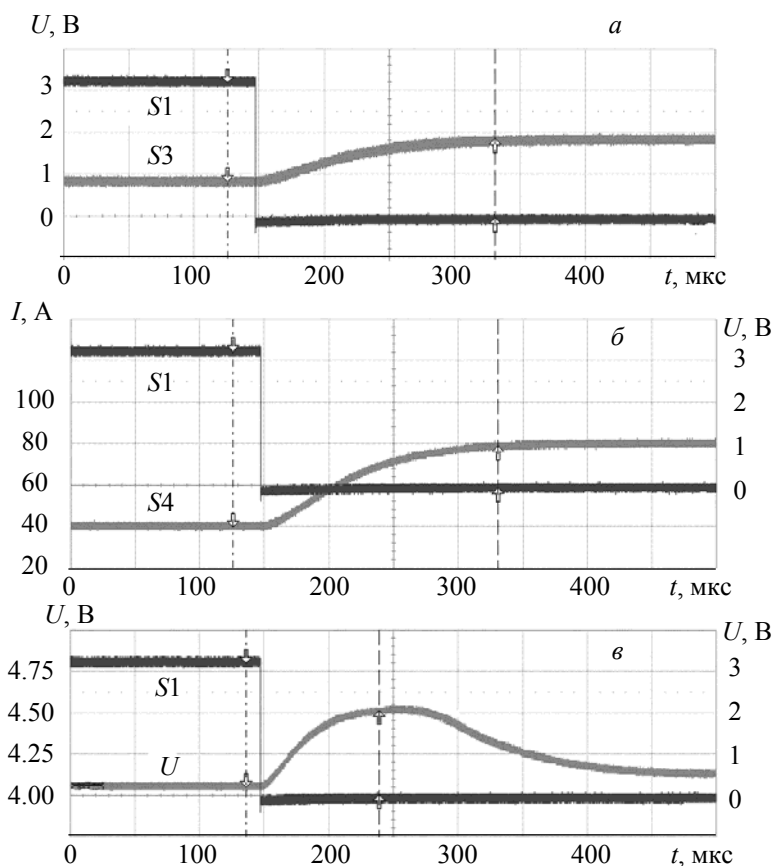


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока драйвера матрицы лазерных диодов: *а* — напряжение на выходе формирующего фильтра *S3*, задающего смену тока с 40 на 80 А, *б* — ток на выходе источника *S4*, полученный с помощью дифференциального щупа-измерителя тока, *в* — напряжение на выходе силового каскада источника *U* при вводе тока в токоведущую линию лазера; *S1* — команда смены значения тока

Поскольку ток и напряжение на выходе ИТН имеют вид гладких кривых без выбросов, вызывающих ложные срабатывания, появляется возможность оборудовать ИТН быстродействующей защитой с высокой точностью установки порогов. Мгновенные значения величин, по которым ведется защита, преобразуются в цифровые значения с помощью АЦП архитектуры SAR с разрешением 18 бит и скоростью 500 тыс. выборок/с, передаются в полностью цифровой контроллер защиты. При срабатывании защиты ток выводится также с контролем скорости изменения.

Заключение. Метод контроля скорости нарастания тока в цепи лазерного излучателя с помощью фильтра низких частот, включенного между задатчиком и усилителем мощности, позволяет исключить действие повреждающих факторов, связанных с высокой скоростью нарастания тока в цепи лазерного излучателя, обеспечивает отсутствие насыщения каскадов драйвера при высоком КПД устройства. Заброс тока при этом отсутствует. Метод может быть использован при формировании фронтов в диапазоне от сотен миллисекунд до десятков наносекунд. Гладкая форма тока и напряжения позволяет повысить точность и быстродействие системы защиты, исключить ложные срабатывания. На основе данной схемы построены унифицированные источники тока: с полной шкалой тока 90 А в непрерывном и импульсном режимах и с полной шкалой тока 300 А в импульсном режиме. Источники тока накачки использовались как при первоначальных настройках, так и в нормальной эксплуатации лазерных устройств: отказов линеек на гарантийных сроках работы не отмечено, что подтверждает правильность данного подхода.

- [1] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, М. А. Щемелев, В. С. Титовец, Л. Агравал, А. Бхардваш. Квант. электрон., **47**, № 4 (2017) 308—312
- [2] Г. И. Рябцев, М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. В. Кабанов, О. Е. Костик, Е. В. Лебедок, К. В. Лепченков, Ф. П. Осипенко, А. Г. Рябцев, А. П. Чайковский, М. А. Щемелев, В. С. Титовец. Опт. журн., **81**, № 10 (2014) 20—25
- [3] M. Lee, C. Hillman, D. Kim. Magazine Military & Aerospace Electronics, **16**, N 6 (2005) 1—5
- [4] P. G. Eliseev. J. Lumin., **7** (1973) 338—356
- [5] W. Nakwaski. J. Appl. Phys., **57**, N 7 (1985) 2424—2430
- [6] M. Hempel, J. W. Tomm, M. Ziegler, T. Elsaesser, N. Michel, M. Krakowski. Appl. Phys. Lett., **97**, N 23 (2010) 231101(1—3), doi: 10.1063/1.3524235
- [7] J. Yang, Y. Tang, J. Xu. Photon. Res., **1**, N 1 (2013) 52—57
- [8] А. О. Темников, А. Р. Гайосо де лос Сантос. Приборостроение, **57**, № 6 (2014) 79—82
- [9] А. Темников, А. Гайосо де лос Сантос, А. Федоров, А. Колесников. Фотоника, **37**, № 1 (2013) 60—63
- [10] А. В. Краснов, В. А. Парфёнов. Приборы и тех. физ. эксперимента, № 2 (2010) 131—134
- [11] И. С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы, Москва, Радио и связь (1986) 450—452
- [12] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48680/AD/ADG713.html>
- [13] У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника, т. II, пер. с нем, Москва, ДМК Пресс (2008) 125—127
- [14] М. Кауфман, А. Сидман. Практическое руководство по расчётам схем в электронике: справочник, 2, пер. с англ., Москва, Энергоатомиздат (1993) 67—75
- [15] В. Г. Коберниченко. Расчёт и проектирование цифровых фильтров: уч.-метод. пособие, Екатеринбург, Урал. ун-т (2013) 33—37