

*М.И. ДЗЮБЕНКО, д-р физ.-мат. наук, И.В. КОЛЕНОВ, канд. физ.-мат. наук,
В.П. ПЕЛИПЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Н.Ф. ДАХОВ*

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Для накачки твердотельных лазеров, как известно, применяются различные интенсивные источники света [1, 2]. В качестве таких источников наибольшее распространение получили газоразрядные лампы непрерывного и импульсного режимов. Несогласованность широкополосного спектра (немонохроматического) излучения ламп накачки с полосой поглощения активной среды приводит к низкому КПД лазеров, высокому тепловыделению в рабочем веществе и большому энергопотреблению лазера в целом. Малый ресурс работы ламп накачки (несколько сот часов) ограничивает срок службы лазера. Широкое распространение в качестве источников возбуждения твердотельных лазеров получили полупроводниковые светоизлучающие диоды (лазерные диоды, лазерные диодные линейки и матрицы) [3, 4]. Это объясняется тем, что твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой по сравнению с лазерами, возбуждаемыми импульсными лампами, обладают на порядок большей эффективностью генерации [5] и существенно меньшим энергопотреблением. Применение узкополосной полупроводниковой накачки приводит к снижению тепловыделения в активной среде и уменьшению термических напряжений в ней, что в свою очередь позволяет формировать лазерные пучки с высокой пространственно-угловой яркостью излучения. Замена ламповых систем накачки системами на основе лазерных диодов обеспечила высокую надежность и стабильность выходных параметров излучения твердотельных лазеров, позволила увеличить ресурс их работы более чем на два порядка. Твердотельные лазеры с диодной накачкой характеризуются компактностью и малым весом. Все это способствует широкому использованию лазеров этого типа в качестве источников излучения для целей локации, дальнометрии, спектроскопии, медицины.

В лазерной дальнометрии актуально использование иттербий-эрбиевого лазера, работающего в относительно безопасной для зрения человека полуторамикронной области спектра. Для данной задачи требуется формирование импульса лазерного излучения длительностью порядка нескольких единиц-десятков наносекунд, что обеспечивается модуляцией добротности резонатора и применением импульсного режима накачки рабочей среды лазера [6]. Время жизни возбужденного состояния эрбия составляет около 8 мс [7], а длительность импульса накачки 3 – 5 мс [8]. Питание лазерных линеек обеспечивается специальными импульсными источниками, которые должны удовлетворять жестким требованиям к амплитуде, форме и стабильности параметров импульса тока [9, 10]. Кроме того, в дальнометрии, например, источник питания должен обеспечивать низкий уровень электромагнитных помех, т.к. зачастую расположен близко к высокочувствительным измерительным блокам [11]. Ниже перечислим требования к импульсным источникам для питания иттербий-эрбиевого лазера: 1) величина импульсного тока – 10 – 100 А; 2) длительность импульса – 500 – 5000 мкс; 3) частота повторения импульсов – 0,1 – 10 Гц. При этом вершина импульса должна быть гладкой, без каких-либо резких выбросов и колебаний, передний фронт крутой со временем нарастания 50 – 100 мкс [12 – 14]. Несоблюдение параметров импульса тока (выбросы тока, длительность импульса) может привести к выходу из строя дорогостоящих светодиодных линеек.

Одним из параметров для блока питания является возможность его адаптации под конкретные задачи, поэтому использование блока, выпускаемого промышленностью, не рассматривалось. Немаловажным является вопрос цены. Существует несколько типовых схем импульсных источников тока для светодиодных линеек. У каждой из схем есть свои пре-

имущества и недостатки [15, 16]. В данной статье описана схема микроконтроллерного импульсного блока питания с полевым транзистором, работающим в линейном режиме с питанием от накопительной емкости [17]. К преимуществам этого подхода можно отнести высокую стабильность импульсов тока, возможность сформировать импульсы тока произвольной формы, низкий уровень электромагнитных помех [11] и возможность реализации с малыми массогабаритными характеристиками. В работах, посвященных данному типу блоков питания (БП), светодиодные линейки обычно включаются в цепь стока полевого транзистора. В данной работе предложена схема с подключением светодиодной линейки в цепь истока полевого транзистора, что позволяет питать лазеры, у которых катод светодиодной линейки соединен с корпусом. Далее рассмотрим принцип работы, схемы и параметры выходных импульсов тока разработанного БП.

Структура, схема и принцип работы блока питания

Блок питания можно разделить на несколько основных узлов: главный управляющий модуль, аналоговый регулятор тока, блок зарядки накопительной емкости, схема защиты диодов лазерной линейки, блок коммуникации с внешними устройствами. На рис. 1 представлена блок-схема разработанного источника питания.

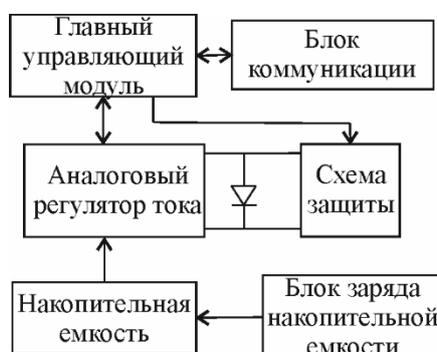


Рис. 1. Блок-схема источника питания полупроводниковой системы накачки активной среды твердотельного лазера

Основой блока питания является главный управляющий модуль, в функции которого входят управление частотой, величиной и длительностью импульса тока, слежение за уровнем тока в нагрузке, управление системой защиты лазерных линеек, коммуникация с внешними устройствами. Блок управления током отвечает за формирование и стабильность импульса тока по входному опорному импульсу от главного управляющего модуля. Блок защиты служит для отключения и шунтирования нагрузки в случае выхода параметров импульса тока за пределы допустимого. Зарядка конденсаторной батареи заданным током осуществляется блоком зарядки. Блок коммуникации позволяет управлять источником питания при помощи внешних устройств (ПК, внешний пульт управления и т.п.). Рассмотрим кратко каждый из описанных блоков.

Главный управляющий модуль построен на базе микроконтроллера (МК) stm32 серии f100 (рис. 2). Опорный импульс формируется микроконтроллером при помощи встроенного 12-тиразрядного ЦАП. Высокая разрядность позволяет задавать величину тока с дискретностью менее 100 мА (диапазон регулировки тока 10 – 100 А). Длительность и период следования импульсов формируются при помощи встроенных в МК таймеров, которые позволяют регулировать временные интервалы с дискретностью порядка сотен наносекунд. Второй выход ЦАП предусмотрен для регулировки напряжения заряда накопительной емкости. Контроль напряжения накопительной емкости осуществляется при помощи встроенного АЦП. Выбор оптимального напряжения заряда емкости необходим для минимизации рассеянной мощности на полевым транзисторе, работающем в линейном режиме.

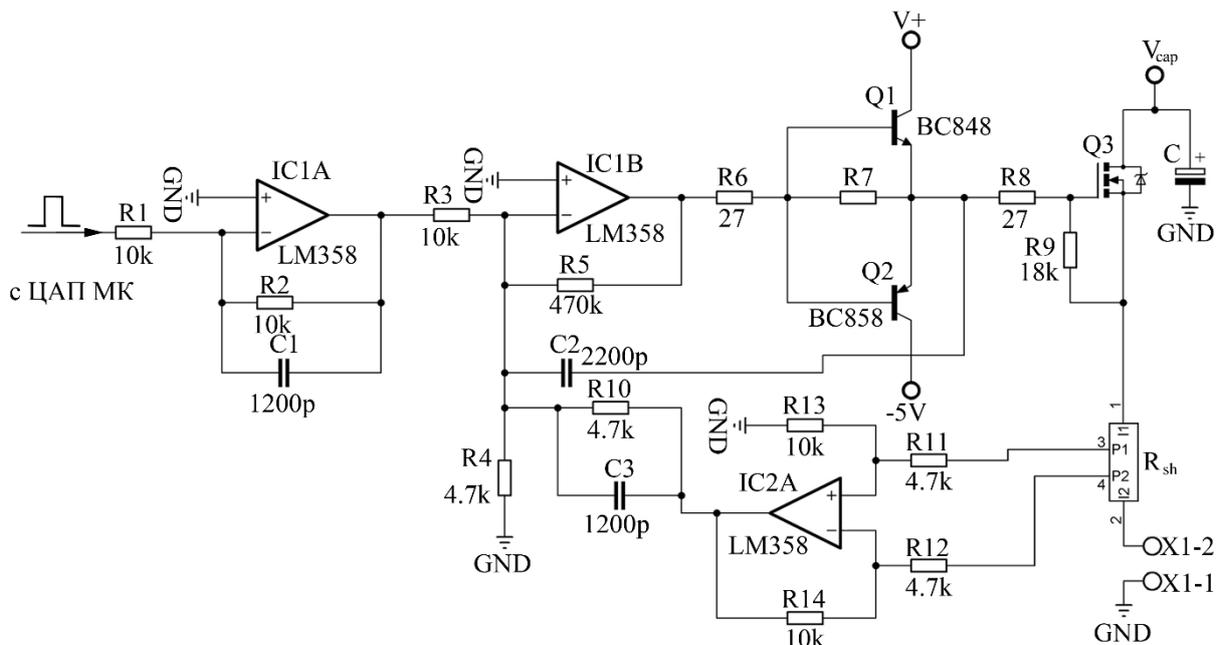


Рис. 3. Принципиальная схема аналогового регулятора тока

Такая, относительно несложная, схема позволяет контролировать форму импульса тока нагрузки с нелинейной вольтамперной характеристикой и практически не ограничивает диапазон регулировки длительности импульса.

На рис. 4 представлена схема защиты светодиодной линейки.

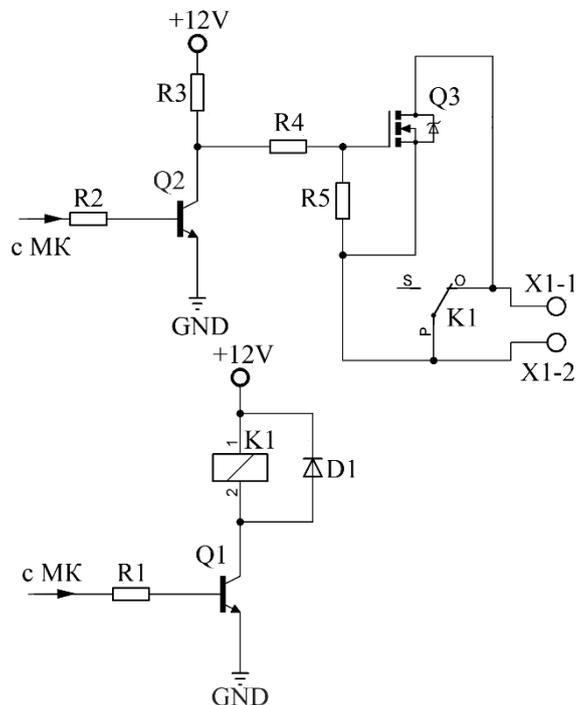


Рис. 4. Схема защиты светодиодной линейки

Схема защиты состоит из реле К1 и полевого транзистора Q3. К клеммам X1 подключается светодиодная линейка, при этом она шунтируется замкнутыми контактами реле К1. Перед началом подачи импульсов тока реле размыкается. Данная схема позволяет исключить влияние на светодиодную линейку переходных процессов при включении и выключении прибора. Наличие полевого транзистора позволяет быстро шунтировать светодиодную линейку при срабатывании модуля защиты. Также предусмотрена схема заряда конденсаторов

с ограничением тока на уровне с возможностью регулировать максимальное напряжение заряда (рис. 5). Данный узел позволяет избежать бросков тока при зарядке конденсаторов и уменьшить рассеиваемую мощность на регулирующем ток светодиодной линейки транзисторе путем выбора оптимального напряжения заряда.

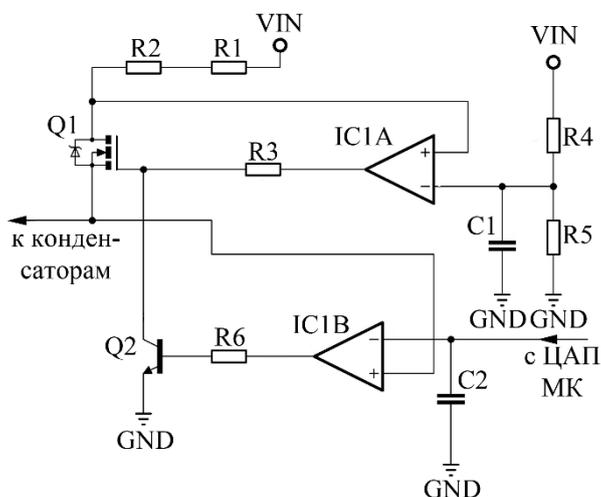


Рис. 5. Схема узла заряда накопительной емкости с контролем напряжения заряда

Блок коммуникации построен по стандартной схеме преобразователя UART<->RS485 с гальванической развязкой [18]. Блок питания в окончательном виде имеет габаритные размеры 100x90x50 мм. Охлаждающим элементом транзисторов служит корпус дальномера. Внешний вид БП представлен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид блока питания лазерной светодиодной линейки

Габаритные размеры БП могут быть уменьшены за счет элементной базы и оптимизации трассировки печатной платы. Далее приведены результаты тестирования и характеристики разработанного источника питания.

Тестирование источника питания

Для отладки и тестирования блока был собран эквивалент лазерной линейки из набора диодов 60ЕРU04. Осциллограммы снимались при помощи осциллографа LeCroy DDA-125. На рис. 7 приведены осциллограммы падений напряжения на токовом шунте 10А/75 мВ, включенном последовательно с эквивалентом нагрузки ($a - 40\text{А}$, $b - 50\text{А}$, $c - 60\text{А}$, $d - 75\text{А}$). Скорость развертки на рис. 7 – 9 составляет 1000 мкс/дел).

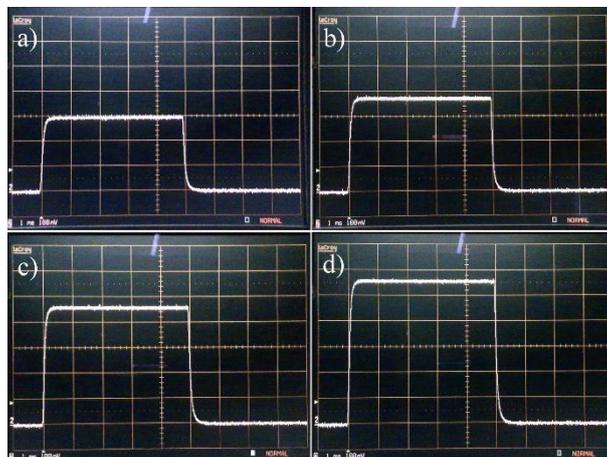


Рис. 7. Осциллограммы тока, измеренного при помощи измерительного токового шунта 75мВ/10А

Из осциллограмм видно, что при различных величинах тока, протекающего через нагрузку, флуктуации тока не превышают шумов осциллографа. При нарастании и спаде тока выбросы отсутствуют, вершина импульса также гладкая, что удовлетворяет требованиям к питанию светодиодной лазерной линейки.

На рис. 8 приведены осциллограммы опорного сигнала и сигнала обратной связи ($a - 40\text{А}$, $b - 50\text{А}$, $c - 60\text{А}$, $d - 75\text{А}$). Осциллограммы сняты с выхода ОУ IC2А, см. рис. 3).

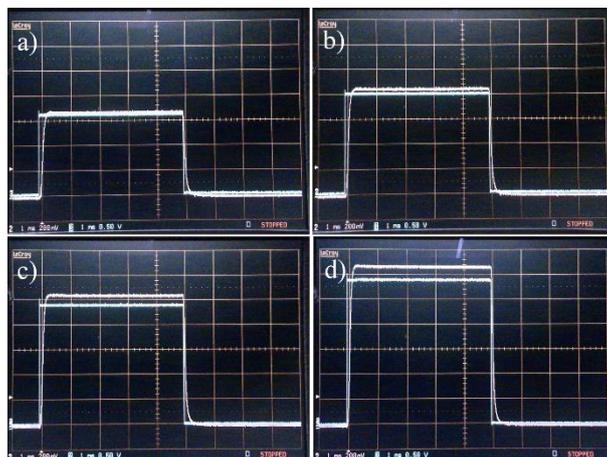


Рис. 8. Осциллограммы опорного сигнала и сигнала обратной связи

Из осциллограмм видно, что импульс тока удовлетворительно повторяет форму опорного сигнала. Время нарастания и спада импульса тока порядка 100 мкс, что вполне удовлетворительно для питания твердотельных лазеров. Падение напряжения на нагрузке при различных величинах тока ($a - 40\text{А}$, $b - 50\text{А}$, $c - 60\text{А}$, $d - 75\text{А}$) представлено на рис. 9. Из рисунка видно, что со временем схема регулирования тока для поддержания заданной величины тока снижает напряжение на эквиваленте нагрузки. Это связано с тем, что при протекании тока

выделяется джоулево тепло, что приводит к увеличению концентрации носителей заряда в области $p-n$ -перехода и снижению прямого падения напряжения на диоде. Также стоит отметить, что броски напряжения отсутствуют как в начале, так и в конце импульса. Вершина импульса также довольно гладкая. Поэтому параметры импульса полностью удовлетворяют требованиям к питанию светодиодной лазерной линейки.

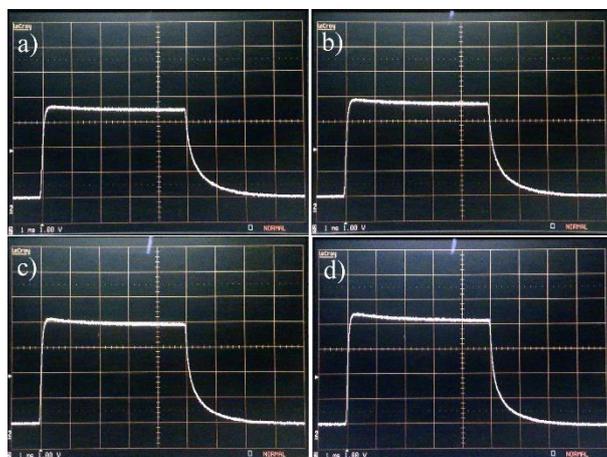


Рис. 9. Осциллограммы падения напряжения на нагрузке при различных величинах тока

Разработанный блок питания используется для возбуждения экспериментального образца иттербий-эрбиевого лазера [9, 20] и в составе дальномера [21]. Во всех случаях, блок питания обеспечивает высокую надёжность работы системы накачки лазера. Также разработанный блок питания позволяет адаптировать себя под различные задачи. Отдельно подчеркнем, что БП не вносит существенных электромагнитных помех в работу чувствительных элементов дальномера (быстродействующие усилители сигналов).

Характеристики блока питания:

1. Диапазон регулировки тока в нагрузка 10 – 100 А с шагом 1 А.
2. Стабильность тока на вершине импульса порядка 1 %.
3. Диапазон регулировки длительности импульса тока: 200 – 5000 мкс с шагом 1 мкс.
4. Диапазон регулировки частоты повторения импульсов тока: 0,1 – 10 Гц с дискретностью 0,1 Гц.
5. При включении/выключении источника питания, на время переходных процессов, цепь питания нагрузки закорочена.
6. Источник питания обеспечивает отсутствие каких-либо отрицательных выбросов (в том числе при включении /выключении источника питания).
7. Максимальное напряжение на нагрузке: 24 В.

Выводы

Разработан и изготовлен источник питания диодной системы накачки иттербий-эрбиевого лазера. Система управления обеспечивает функции защиты нагрузки в аварийных режимах, управление зарядом накопительных конденсаторов до необходимого напряжения и генерацию импульсов тока для питания лазерной линейки. Регулирующим ток элементом является полевой транзистор, работающий в линейном режиме. При этом нагрузка включается в цепь истока полевого транзистора, а опорный сигнал генерируется ЦАП микроконтроллера. Такой подход позволил создать относительно простой, надежный и малогабаритный источник питания лазера с широким диапазоном регулировки всех выходных параметров, в том числе формы импульса тока. Это обеспечивает возможность подбора оптимального режима работы лазера и защиту дорогостоящих линеек лазерных диодов от выхода из строя. После некоторой доработки (установка более быстродействующих операционных

усилителей, элементов обратной связи, внесение изменений в прошивку МК) источник может быть использован для накачки других твердотельных лазеров на основе примесных излучающих центров с более коротким, чем у эрбия, временем жизни верхнего лазерного уровня.

Список литературы:

1. Импульсные источники света ; под ред. И.С. Маршака. Москва : Энергия, 1978. 472 с.
2. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. Москва : Сов. радио, 1980. 104с.
3. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для непрерывных твердотельных лазеров // Лазерные системы и их применение: Сб. тр. Москва, 2004. С. 45 – 46.
4. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для импульсных полупроводниковых лазерных линеек // Наука и образование. 2012. № 4. С. 1-8.
5. Boutchenkov V. et al. High efficiency diode-pumped Q-switched Yb:Er:Glass lasers // Optics Communications. 2000. Vol. 177. P. 383 – 388.
6. Sennaroglu A. Solid-State Lasers and Application. Taylor & Francis Group, LLC. 2007. P. 552.
7. Абазадзе А.Ю., Быков В.Н., Зверев Г.М., Плешков А.А., Симаков В.А. Высокоэффективный мини-лазер с импульсной полупроводниковой поперечной накачкой для безопасной лазерной дальнометрии // Квантовая электроника. 2002. Т.32, №3. С.210 – 212.
8. Dzyubenko M.I., Konrady V.A., Maslov V.V., Nikolaev Yu.P., Shevchenko V.V. Aluminium barium phosphate glass laser emitting at $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ // Functional Materials. 2008. V.15, No.3. P.455 – 458.
9. Koehner W. Solid-State Laser Engineering. Springer. 2013. P. 750.
10. Thompson M. T. and Schlecht M. F. High power laser diode driver based on power converter technology // IEEE Trans. Power Electron. 1997. Vol. 12. No. 1. P. 46 – 52.
11. Anil K. Maini. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. Dehli: Wiley, 2013.
12. Xiao H. et al. Development of a high-stability at-top pulsed magneticeld facility // IEEE Trans. Power Electron. 2014. Vol. 29. No. 9. P. 4532 – 4537.
13. Penovi E., Retegui R.G., Maestri S., Uicich G., and Benedetti M. Multistrukture power converter with h-bridge series regulator suitable for high-current high-precision-pulsed current source // IEEE Trans. Power Electron. 2015. Vol.30. No. 12. P. 6534 – 6542.
14. Glover S.F., White F.E., Reed K.W., and Harden M.J. Genetic optimization for pulsed power system conguration // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. No. 2. P. 339 – 346.
15. Zhao Q., Cao R., Wang D., Yuan J., and. Li S. Pulse power supply for high-power semiconductor laser diode arrays with micro-current pre-start control // IEEE Access. 2018. Vol. 6, P. 76682 – 76688.
16. Zhao Q., Li S., Cao R., Wang D., and Yuan J. Design of pulse power supply for high-power semiconductor laser diode arrays // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 92805 – 92812.
17. Дзюбенко М.І., Коленов І.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Імпульсне джерело живлення лазерних діодних лінійок для накачування ербієвого лазера // Тези доп. XV міжнар. наук. конф. «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 10-11 квітня 2019 р., м. Харків. С.503 – 504.
18. Low Cost Isolated RS-485 Transceivers [Электронный ресурс] // NVE Corporation. Режим доступа: <https://www.nve.com/Downloads/il3085.pdf>.
19. Дзюбенко М.І., Коленов І.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Ербієвий лазер з діодною накачкою і модульованою добротністю // Тези доп. XV між нар. наук. конф. «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 10-11 квітня 2019 р., м. Харків. С.504 – 505.
20. Дзюбенко М.І., Коленов І.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Лазер на ербієвом стекле с диодной накачкой // Радиотехника. 2019. № 199. С. 104 – 109.
21. Дзюбенко М.І., Коленов І.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Безпечний для зору лазерний далекомір // Тези доп. XIX наук.-техн. конф. «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах», 5-6 вересня 2019 р., м. Чернігів. С. 83 – 84.

*Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усикова НАН Украины*

Поступила в редколлегию 17.04.2020