

ВЫСОКИЕ ТОКИ ДИОДА С УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫМ ДРАЙВЕРОМ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

К. Шмёбе, MESSTEC Power Converter,
www.powerconverter.eu, Германия

Для многих прикладных лазерных приложений, таких как маркировка, аддитивные технологии, обработка материалов, научные исследования и т. д. [1], требуется лазерное излучение с короткими импульсами, генерируемое диодами с использованием высоких токов. Для этих условий часто требуются диодные токи от 100 А до 200 А и более с длительностью времени нарастания импульса 20–50 нс. Кроме того, импульсы должны иметь четкую прямоугольную форму с коротким временем нарастания импульса, крутым передним фронтом импульса, без выбросов или пульсаций. В данной статье обсуждаются физические ограничения на получение таких форм тока и объясняются технические решения, реализуемые с помощью драйверов лазерных диодов. Такие драйверы обеспечивают работу лазерных диодов с высокими токами в режиме сверхкоротких импульсов излучения.

На рис. 1 представлена принципиальная схема источника питания S1, высокопроизводительного диодного драйвера (модулятора) M1 и лазерного диода D1. Над пороговой точкой оптическая мощность увеличивается в основном пропорционально току через лазерный диод. Только при использовании **реального источника тока** ток диода и его оптическая мощность могут регулироваться максимально точно [2]. Измененные стандартные источники напряжения никогда не смогут управлять током диода должным образом и обладают риском возникно-

VERY SHORT PULSED HIGH DIODE CURRENTS GENERATED BY A FAST LASER DIODE DRIVER

K. Stöbe, MESSTEC Power Converter,
www.powerconverter.eu, Germany

For many laser applications, such as marking, additive manufacturing, material treatment, scientific research, etc. [1] short pulses with high diode currents are required. For these applications diode currents of 100A ... >200A with rise times of 20ns ... 50ns are often needed. In addition, the pulses shall have a clear rectangular shape with short rise time, steep rising edges, no overshoot and no ripple. This article shows the physical restrictions and explains technical solutions how laser diode drivers can realize high diode currents with very short pulse lengths.

The following drawing Fig. 1 shows a principle circuit diagram of a power supply S1, a fast diode driver (modulator) M1 and a laser diode D1. Above the threshold point the optical power increases basically proportionally with the current through the laser diode. Only with a **real current source** the diode current and so the optical power can be controlled precisely [2]. Modified standard voltage supplies can never control the diode current in the requested way and have a high risk of current peaks which damage the laser diode. A real current source has the inherent advantage that the output voltage of the driver adjusts itself automatically to the diode voltage.

Therefore, all the following explanations refer to a driver as a real current source.

The biggest physical limitation for a very fast rise time <1µs are the parasitic **inductances** between driver and laser diode [3]. In parallel cables these inductances

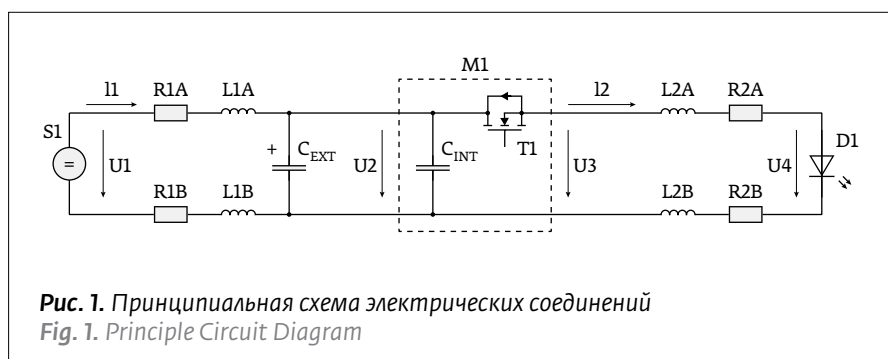


Рис. 1. Принципиальная схема электрических соединений
Fig. 1. Principle Circuit Diagram

Messtec Power Converter

(Германия)

www.powerconverter.eu



Производитель драйверов для лазерных диодов с более 25-летним опытом работы. Компания имеет собственный завод с полным циклом производства, на котором осуществляется электронное и механическое производство компонентов, а также сборка и тестирование устройств и модулей. Ассортимент продукции включает в себя готовые устройства, блоки питания, системы охлаждения, панели управления.

Компания ОЭС "Спецпоставка" представляет весь спектр продукции MESSTEC Power Converter на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также поставку образцов.

вения высоких пиков тока, которые разрушают лазерный диод. Прямой источник тока имеет изначальное преимущество, состоящее в том, что выходное напряжение драйвера автоматически адаптируется к напряжению диода. Поэтому все следующие объяснения, приведенные в данной статье, относятся к драйверам, представляющим собой прямые источники тока.

Самое большое физическое ограничение, накладываемое на длительность быстрого времени нарастания импульса <1 мкс, состоит в наличии паразитной индуктивности, создаваемой между драйвером и лазерным диодом [3]. В параллельных кабелях эта индуктивность очень высокая и крайне замедляет необходимую быструю длительность времени нарастания импульса. Следующая формула показывает расчет индуктивности для двух параллельных кабелей [4]:

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} (\ln(d/a) + Y/2).$$

Показано, что индуктивность в основном растет в зависимости от увеличения длины кабелей (l) и расстояния между кабелями (d).

Чтобы снизить величину этой индуктивности, нужно стремиться сделать расстояние между драйвером и диодом минимальным. Это означает, что диод должен быть вмонтирован непосредственно в драйвер. Кроме того, кабели должны быть заменены параллельными про-

are very high and slow down the required fast rise time tremendously.

The following formula shows the calculation of the inductance for two parallel cables [4]:

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} (\ln(d/a) + Y/2).$$

This shows that the inductance mainly increases with the length of the cables (l) and with the distance between the cables (d).

In order to reduce these inductances the distance between the driver and the diode must be as short as possible. This means that the diode must be mounted directly to the driver. In addition, the cables must be replaced by parallel conducting sheets as close as possible and placed in a way that the inductances compensate each other.

A **fast control** of the diode current is required for very short rise times of 20ns ... 50ns as well as for high frequencies up to 30MHz or for fast alternating set-points. A further requirement is a clear signal shape without overshoot above the set-point which could damage the laser diode. Very fast pulses are used e. g. for medical applications.

The best technical realization for a precise current control is a fast analog circuit without microprocessor in the control loop which has the disadvantages of delays caused by internal cycle time and jitter.

High accuracy control of the diode current is needed for the conversion of the input set-point into a precise diode current as well as for fast compensation of ripples.

Also for this requirement an analog controller with high precision electronic components is preferred because limitations by digital bit resolution of analog/digital converters are avoided. Additionally, an optimized PCB layout prevents from interferences and deviations of fast electronic signals.



Рис. 2. Высокоточный диодный драйвер
Fig. 2. Fast Diode Driver

водящими пластинами, расположенными как можно ближе, и размещены таким способом, чтобы индуктивность была компенсирующей.

Быстрое управление током диода требуется для сверхкороткой длительности времени нарастания импульса 20–50 нс, а также для высоких частот до 30 МГц или для быстрого чередования пиков. Другим требованием является четкая форма сигнала без выбросов за пределы пика, которые могут разрушить лазерный диод. Сверхбыстрые импульсы используются, например, для медицинского оборудования.

Лучшая техническая реализация для точного управления током – сверхбыстрая аналоговая схема без микропроцессора в контуре управления, который обладает недостатком в виде задержек, вызванных временем внутреннего цикла, и колебаниями задержки.

Высокоточное управление тока диода необходимо для преобразования входного сигнала

High short pulsed diode currents >200A can be generated by special power transistors with fast switching times, low internal resistance, good avalanche behavior and good heat transfer. High currents with short pulses are required e.g. for material treatment.

Capacities at the output side of the driver can cause **energy peaks** which occur e.g. in case of a defect of a single diode within a diode stack or if the diode is disconnected and connected to the driver again. These energy peaks will damage the laser diode. In order to keep the diode current unchanged capacities at the output side of the driver are not allowed.

Another physical restriction is the **skin effect** [5] which is contra-productive especially for high currents. A DC current or a AC current with low frequencies uses the whole wire cross-section. However, due to the skin effect the conduction electrons for currents with high frequencies are forced to the surface of the conductor. Therefore, the full cross-

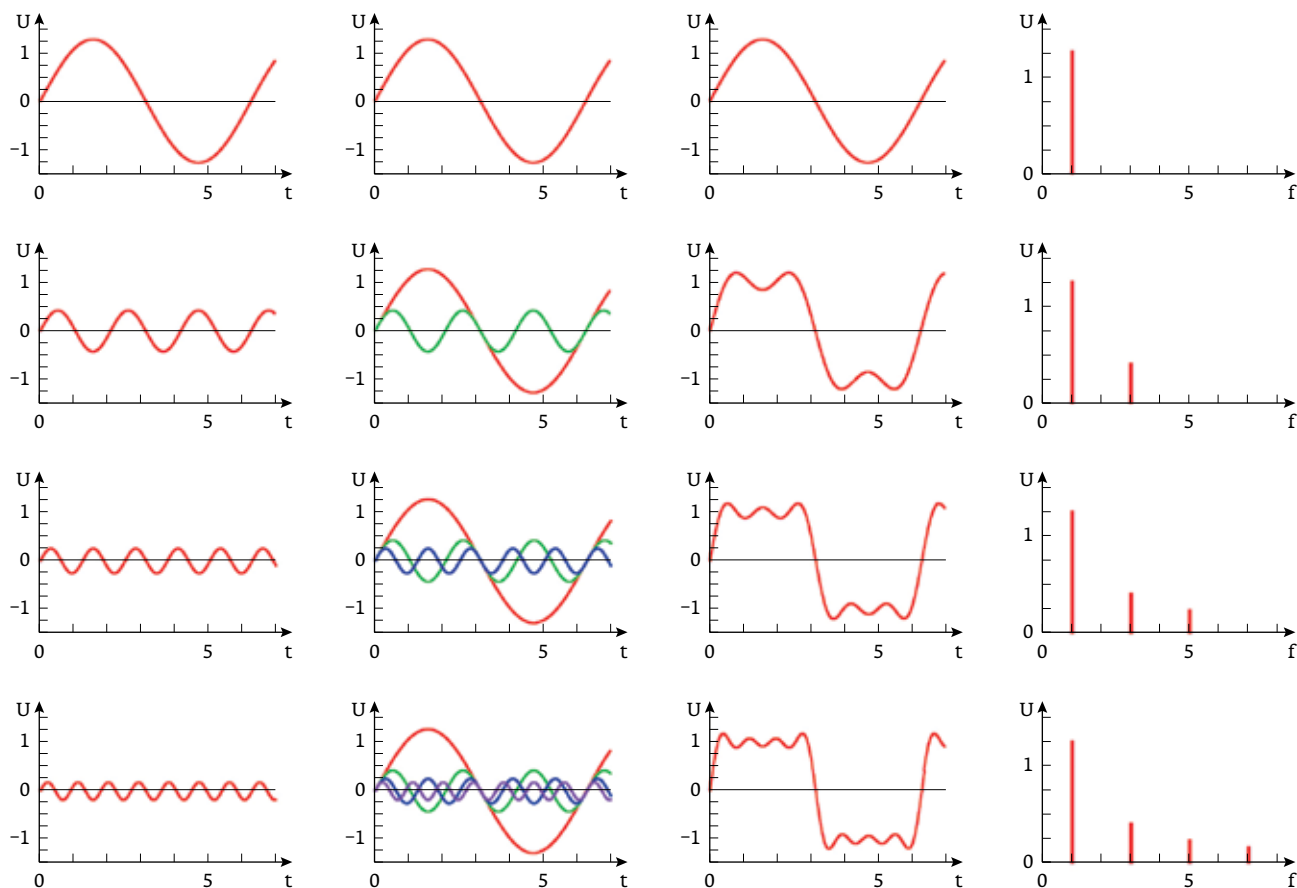


Рис. 3. Гармонические синусоидальные волны
Fig. 3. Harmonic Sine Waves

в точный ток диода, а также для быстрой компенсации пульсаций.

Также для этого требования предпочтительней использовать аналоговый контроллер с высокоточными электронными компонентами, потому что именно так можно избежать ограничений, вызванных цифровым битовым разрешением аналоговых/цифровых конвертеров. Кроме того, оптимизированное расположение разводки на печатной плате защищает от помех и отклонений сверхбыстрых электронных сигналов.

Высокие токи диода с сверхкороткими импульсами > 200 А могут быть сгенерированы специальными мощными транзисторами с быстрым временем переключения, низким внутренним сопротивлением, хорошими лавинными характеристиками и подходящей теплоотдачей. Высокие токи с ультракороткими импульсами требуются, например, для обработки материалов.

Емкости на выходной стороне драйвера могут вызвать **энергетические пики**, которые возникают, например, в случае дефекта единственного диода в диодном блоке, или если диод был отключен и подключен к драйверу снова. Эти энергетические пики повреждают лазерный диод. Чтобы поддерживать неизменный ток диода, присутствие емкости на выходной стороне драйвера не допускается.

Другим физическим ограничением является **поверхностный эффект (скин-эффект)** [5], который является контрпродуктивным, особенно для высоких токов. Постоянный или переменный ток с низкими частотами использует все поперечное сечение провода. Однако из-за скин-эффекта электроны проводимости при высокочастотных токах локализуются в приповерхностном слое проводника. Поэтому вся площадь поперечного сечения не используется для всего тока диода, а только площадь поверхности проводника, что приводит к более высокому омическому сопротивлению.

Требуемые прямоугольные сигналы для импульсов являются причиной этого эффекта. Согласно анализу Фурье, эти сигналы состоят из наложения многих высокочастотных гармонических синусоидальных волн. Это дополнительное омическое сопротивление зависит от частоты; например, глубина скин тока с частотой 10 МГц всего 21 мкм.

Поэтому должны использоваться плоские металлические пластины (полосковые линии) [6] со специальным покрытием для

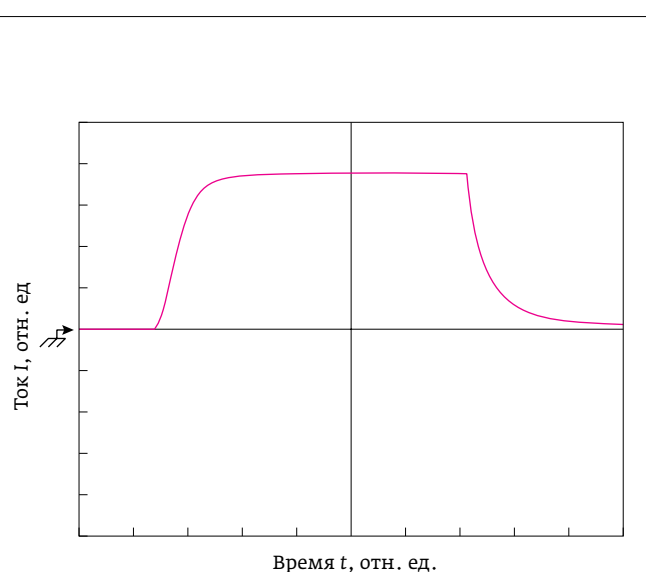


Рис. 4. Чистый сигнал

Fig. 4. Clear Signal

sectional area is not available for the whole diode current anymore, but only the surface areas of the conductor which leads to a higher ohmic resistance. The requested rectangular signals for pulses are the reason for this effect. According to Fourier analysis these signals consist of an overlay of many high frequency harmonic sine waves.

This additional ohmic resistance depends on the frequency; e.g. the skin deepness of a current with 10MHz is only 21 μm .

Therefore, flat metal sheets (striplines) [6] with special coating must be used in order to achieve a higher surface cross-section for the current flow.

There are inductances and capacities within the laser diode caused by internal electrical wiring and by assembly of diode components as well as inductances and capacities in the connection between driver and laser diode.

These physical effects influence the control mode for the diode current. Therefore, in combination with the control parameter of the driver there is a high risk that the whole system "fast diode driver – laser diode" will show severe **oscillations** which could damage the driver and / or the laser diode. The following figures show a clear signal and an output signal with oscillations.

Therefore, the control loop of the fast diode drivers must be adapted and optimized to the inductive and capacitive load situation.

This **adaptation and optimization** must be done in two steps. In the first step a short mechanical connection according to above described measures

достижения более высокого поверхностного поперечного сечения для прохождения электрического тока.

При более детальном рассмотрении также наблюдается индуктивность и емкость в лазерном диоде, вызванная внутренней электропроводкой и сборкой диодных компонентов, а также индуктивность и емкость в соединении между драйвером и лазерным диодом.

Эти физические эффекты влияют на режим управления током диода. Поэтому в сочетании с параметром управления драйвера существует высокий риск того, что вся система "высокопроизводительный диодный драйвер – лазерный диод" будет демонстрировать серьезные **колебания**, которые могут повредить драйвер и/или лазерный диод. Следующие данные показывают чистый, не зашумлённый сигнал и выходной сигнал с колебаниями. Поэтому контур управления высокопроизводительных диодных драйверов должен быть адаптирован и оптимизирован к ситуации с индуктивной и емкостной нагрузкой.

Эта **адаптация и оптимизация** осуществляется в два этапа. На первом этапе должно быть оптимизировано короткое механическое соединение согласно вышеупомянутым описанным мерам. Далее, на втором шаге необходимо адаптировать параметры управления, такие как R-компоненты и I-компоненты, к характеристикам управления всей системы "высокопроизводительный диодный драйвер – лазерный диод". Цель – добиться сверхбыстрых динамических характеристик с сверхкороткой длительностью времени нарастания и среза импульса, крутым передним и задним фронтом импульса, а также с предотвращением выбросов.

Индуктивность и омические сопротивления **длинных кабелей питания** между источником питания S1 и драйвером M1 (см. рис. 1) могут привести к пробоям напряжения на входной стороне драйвера во время высокоэнергетических импульсов или высокоскоростной модуляции. Необходимо дополнительно рассматривать эти характеристики для оценки переменного/постоянного тока источника питания S1.

Кроме кабелей с большим поперечным сечением, буферный конденсатор с дополнительной внешней емкостью C_{EXT} обеспечивает энергию кратковременного действия.

На рис. 6 и 7 показаны целые установки, состоящие из лазерного диода, высокопро-

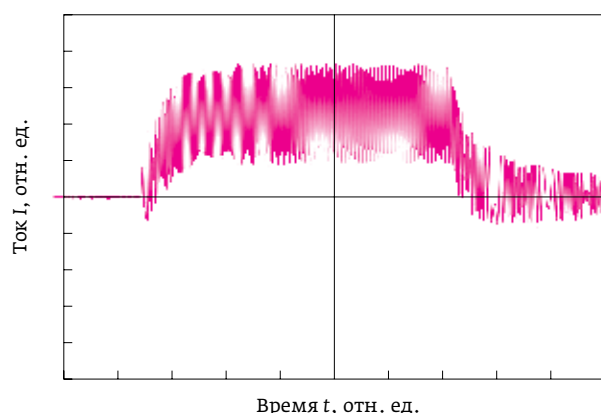


Рис. 5. Сигнал с колебаниями

Fig. 5. Signal with Oscillations

must be optimized. Then in a second step the control parameter such as P-component and I-component must be adapted to the control behavior of the whole system "fast diode driver – laser diode". The targets are the fastest possible dynamic behavior with short rise and fall times, steep rising and falling edge as well as avoiding overshoots.

The inductivities and ohmic resistances of **long supply cables** between the power supply S1 and the driver M1 (see fig. 1) can lead to voltage break downs at the driver input during high energetic pulses or fast modulated operation. This must be additionally considered for the rating of the AC/DC power supply S1. Beside cables with a higher cross-section a buffer capacitor with additional external capacity C_{EXT} provides short-term energy.

Fig. 6 and Fig. 7 show whole set-ups consisting of a laser diode, a fast diode driver and a buffer capacitor completely assembled on a heat sink.

A **ripple** in the diode current will be transformed into a ripple in the laser light emission. This is an undesirable effect and affects the laser process negatively. Standard drivers cause an alternating output signal on top of the diode current due to internal switched-mode technology. In the opposite, drivers based on a linear current controller technology do not have this effect. The input control signal is exactly converted to the output current without disruptions and alterations.

Unfortunately, linear current controllers have the disadvantage of higher power dissipation. But for short pulses with a normally low duty cycle this power dissipation is manageable.

Formula for short pulses with duty cycle, see fig. 1:

$$P_v \leq (U_2 - U_3) \cdot I_2 \cdot \text{duty cycle.}$$



Рис. 6. Установка с буферным конденсатором и диодом DILAS

Fig. 6. Set-Up with Buffer Capacitor and DILAS Diode

изводительного диодного драйвера и буферного конденсатора, полностью собранного на теплоотводе.

Пульсация в токе диода будет преобразована в пульсацию излучения лазерного света. Это нежелательный эффект, который отрицательно сказывается на лазерной генерации. Стандартные драйверы вызывают переменный выходной сигнал на вершине тока диода из-за внутренней технологии коммутируемого режима. Напротив, драйверы на основе технологии линейного контроллера тока не имеют этого эффекта. Входной сигнал управления точно преобразовывается в выходной ток без сбоев и изменений.

К сожалению, недостаток линейных контроллеров тока состоит в большем рассеянии мощности. Но для коротких импульсов с низким рабочим циклом этим рассеянием мощности можно управлять.

Формула для коротких импульсов с рабочим циклом, см. рис. 1:

$$P_v \leq (U_2 - U_3) \cdot I_2 \cdot \text{рабочий цикл}.$$

Пример:

$$P_v \leq (12 [В] - 9 [В]) \cdot 200 [А] \cdot 0,05 = 30 [Вт].$$

Механически шлифованная порошком тонкого помола и полированная пластина, исполь-

Example:

$$P_v \leq (12 [В] - 9 [В]) \cdot 200 [А] \cdot 0,05 = 30 [Вт].$$

A precise mechanically fine grinded and lapped base plate of the driver in combination with heat transfer paste and a heat sink – ideally made of copper for high requirements – guarantees a sufficient heat transfer from the diode driver to the heat sink which is cooled by air or water.

With the above described measures and with the right electronic design the following **further technical requirements** can be fulfilled:

- The driver does not need a fan. Fans are noisy and have often a low reliability.
- The dimensions of the driver are small (approx. 100mm·60mm·20mm) and the weight is low (approx. 250g), so that the driver can be assembled directly to the diode even in a moving laser head.
- The driver has two overlaying set-point inputs and one BIAS potentiometer so that a CW operation, a pulsed operation, a modulation or any mixed signals with arbitrary curves are possible.
- The fast precise analog electronic circuit also allows a monitoring of the actual diode current in real time.

In the following table the main fast diode driver models are shown.



Рис. 7. Установка с диодом BWT

Fig. 7. Set-Up with BWT Diode

Основные модели высокопроизводительных диодных драйверов

Main Models of Fast Drivers

Тип Type	Макс. ток диода (НР), А ¹ Max Diode Current (CW), А ¹	Макс. ТОК диода (кор. имп.), А ¹ Max Diode Current (short pulse), А ¹	Напряже- ние диода, В Diode Voltage, V	Выходная мощность, Вт Output Power, W	Время нарастания импульса ок., нс ² Rise Time, ns ²	Частота, МГц ² Frequency, MHz ²	Макс. потеря мощности, Вт Max. Power Loss, W
VFM 60-06	60	120	4,5	270	20	30	90
VFM 60-25	60	120	24	1 440	20	30	90
VFM 60-50	60	120	49	2 940	20	30	90
FM 100-06	100	200	4,5	450	50	20	150
FM 100-25	100	200	24	2 400	50	20	150
FM 100-50	100	200	49	4 900	50	20	150

¹ Макс. ток, доступны модели с меньшим током.

Max. current, models with lower current available.

² Зависит от лазерного диода и конфигурации системы «высокопроизводительный диодный драйвер – лазерный диод», упомянутая длительность времени нарастания импульса и частота могут варьироваться в большую и меньшую сторону соответственно. Depends on the laser diode and configuration of the whole system "fast diode driver-laser diode"; the mentioned rise times and frequencies may deviate upwards or downwards accordingly.

зубая в драйвере в сочетании с термопастой и теплоотводом, сделанная из меди, гарантирует достаточную теплопередачу от диодного драйвера к теплоотводу, который охлаждается воздухом или водой.

Следуя вышеописанным принципам и соблюдая правильное построение электронной конструкции, можно достичь соблюдения заданных условий и выполнения следующих **технических требований**:

- Драйверу не нужен вентилятор. Вентиляторы – дополнительный источник шума и часто они имеют низкую надежность.
- Габаритные размеры драйвера малы (приблизительно 100 мм × 60 мм × 20 мм), как и вес (около 250 г). Поэтому драйвер можно смонтировать непосредственно на диоде даже в движущейся лазерной головке.
- Драйвер имеет два перекрывающихся входа установки и один потенциометр BIAS так чтобы обеспечить возможность непрерывной, импульсной работы, модуляции или любых смешанных сигналов с произвольными кривыми.
- Высокопроизводительная точная аналоговая электронная схема позволяет контро-

MESSTEC Power Converter has developed fast laser diode drivers which have integrated best technical solutions and above explained advantages. They can operate in CW, modulated or pulsed mode with any arbitrary curves and can be used in combination with all laser diode manufacturers.

MESSTEC also delivers complete set-ups and electro-mechanical modules with diode driver, laser diode, heat sink and optimized control loop.

List of industries for which MESSTEC drivers are used:

- Additive Manufacturing
- Sapphire Glass Treatment
- Railway
- Printing Industry
- Marking, Engraving, Labeling
- PCB Manufacturing
- Material Heating
- Surface Processing
- Medical Devices
- Pumping for DPSS Lasers
- Nano Processing
- Very Fast Pulsing
- Plastic Welding
- Military
- Safety Technology
- Research Institutes
- Universities



лизовать фактический ток диода в режиме реального времени.

В таблице представлены основные модели высокопроизводительных диодных драйверов. Компания "MESSTEC Power Converter" разработала высокопроизводительные драйверы лазерного диода, в которых интегрированы лучшие технические решения и описанные выше преимущества. Они могут работать в непрерывном, модулируемом или импульсном режиме с любыми произвольными кривыми и могут использоваться в сочетании с лазерными диодами любых производителей.

MESSTEC также поставляет полные установки и электромеханические модули с диодным драйвером, лазерным диодом, теплоотводом и оптимизированным контуром управления.

Список отраслей, в которых используются драйверы компании MESSTEC, обширный:

- Аддитивные технологии.
- Обработка сапфирового стекла.
- Железнодорожная отрасль.
- Полиграфия.
- Маркировка, гравировка, штампы.
- Производство печатных плат.
- Нагревание материалов.
- Поверхностная обработка.
- Медицинские устройства.
- Накачка для твердотельных лазеров с диодной накачкой.
- Нано-обработка.
- Ультрабыстрая пульсация.
- Сварка пластмасс.
- Военная промышленность.
- Технология безопасности.
- Научно-исследовательские институты.
- Университеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Sugioka Koji, Ya Cheng.** Ultrafast lasers – reliable tools for advanced materials processing // Light: Science & Applications 3.4 (2014): e149.
2. **Schubert E. Fred.** Light-emitting diodes. E. Fred Schubert, 2018.
3. **Mead C.** "Fundamental limitations in microelectronics–I. MOS technology." // Solid State Electronics 15 (1972): 819–829.
4. **Deyo Eric.** A method to calculate inductance in systems of parallel wires // arXiv preprint arXiv:1612.02471 (2016).
5. **Dyson Freeman J.** Electron spin resonance absorption in metals. II. Theory of electron diffusion and the skin effect // Physical Review 98.2 (1955): 349.
6. **Scogna A.** Ciccomancini, Schauer M. Stripline simulation model with tapered cross section and conductor surface profile // Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC2007. IEEE International Symposium on. IEEE, 2007.

САМЫЕ КОМПАКТНЫЕ В МИРЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МАССИВЫ АТТЕНУАТОРОВ ОТ КОМПАНИИ AGILTRON

С развитием производства более мощных чип-лазеров и необходимостью создания более чув-



ствительных интегрированных фотодетекторов, а также волновоодно-интегрированных однофотонных детекторов, возрастает потребность в компонентах интегрированной фотоники для использования оптического управления мощностью через перестраиваемые оптические аттенуаторы (VOA). Многие из применений требуют использования сборок и массивов из таких компонентов, но площадь микрочипа ограничивает их размеры.

Поэтому такие узлы должны быть компактными, а традиционная технология, используемая в перестраиваемых оптических аттенуаторах, созданных на кремнии, основана на использовании электронного PIN-диода. Тот предназначен для инжекции носителей заряда через поперечное сечение кремниевого фотонного волновода.

Компания **Agiltron** (США) производит волоконно-оптические аттенуаторы высокой производительности с низким уровнем вносимых потерь и является ведущим производителем в этой отрасли. Серия MM VOA полностью соответствует стандартам надежности коммуникационной компании Telcordia 1209 и 1221.

В августе 2018 года компания представила уникальные массивы аттенуаторов с 8-ю каналами. На сегодняшний день они являются самыми компактными в мире!

Новая линейка монтируемых на плату миниатюрных волоконных перестраиваемых оптических аттенуаторов (VOA) способствует лучшей интеграции оптики с электроникой. Новые перестраиваемые аттенуаторы основаны на запатентованном термоактивированном зеркале Agiltron с микрообработкой. Зеркало имеет возможность перемещаться вдоль и поперек распространения оптического луча. Такая усовершенствованная конструкция исключает многие недостатки, присущие стандартным микроэлектромеханическим системам (MEMS), и обеспечивает:

- высокую стабильность и надежность;
- отсутствие наводок, вызванных накопленным электрическим зарядом;
- нечувствительность к влаге.

Компания "ОЭС Спецпоставка" представляет весь спектр продукции **Agiltron** на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также поставку образцов. Получить дополнительную информацию вы можете на сайте компании oessp.ru.

Мария Жукова

ООО "ОЭС Спецпоставка"