

ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ: РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ПРИМЕНЕНИЕ

Г. Т. Микаелян, В. А. Панарин, И. В. Галушка

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Инжект»
(ООО «НПП «Инжект»)

Значительный вклад в развитие приоритетных фундаментальных открытий – физических основ для создания полупроводниковых инжекционных лазеров и создание лазеров на гетеропереходах внесли исследования Басова Н. Г., Крохина О. Н. и Попова Ю. М. по получению состояний для вынужденного излучения в полупроводниковых р-п-переходах [1]. Предложения российских ученых-физиков Алферова Ж. И. и Казаринова Р. Ф. и создание полупроводниковых лазеров на гетеропереходах стали отправной точкой, с которой началось развитие новой эпохи развития полупроводниковых лазеров [2].

Ввиду множества встречающихся в литературе различных определений лазера хочется выделить наиболее отражающее суть его работы. Лазер (от англ. light amplification by stimulated emission of radiation – усиление света посредством вынужденного излучения) – генератор электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов. Здесь следует акцентировать внимание – именно индуцированных (вынужденных) переходов – это, пожалуй, является главным отличием лазеров от других источников излучения.

Независимо от варианта исполнения конструкции лазер состоит из следующих составляющих: 1) лазерная активная среда, 2) накачка, 3) резонатор лазера. Схематичное изображение лазера представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схематичное изображение устройства лазера

Одним из видов полупроводникового лазера, в котором накачка создается за счет инжекции носителейзаряда через р-п-переход, называется инжекционный лазер (диодный лазер).

Коротко описывая технологию изготовления полупроводниковых инжекционных (диодных) лазеров, ееможнопредставить в виде последовательности технологических операций, изображенной на рис. 2.



Рис. 2. Схема изготовления полупроводниковых инжекционных (диодных) лазеров

Для изготовления диодных лазеров требуются структурно совершенные монокристаллы. Монокристалл выращивается методом вертикальной направленной кристаллизации вдвижущемся градиенте температур. Моделирование изменения температуры и плотности дислокаций на этапе охлаждения представлено на рис. 3.

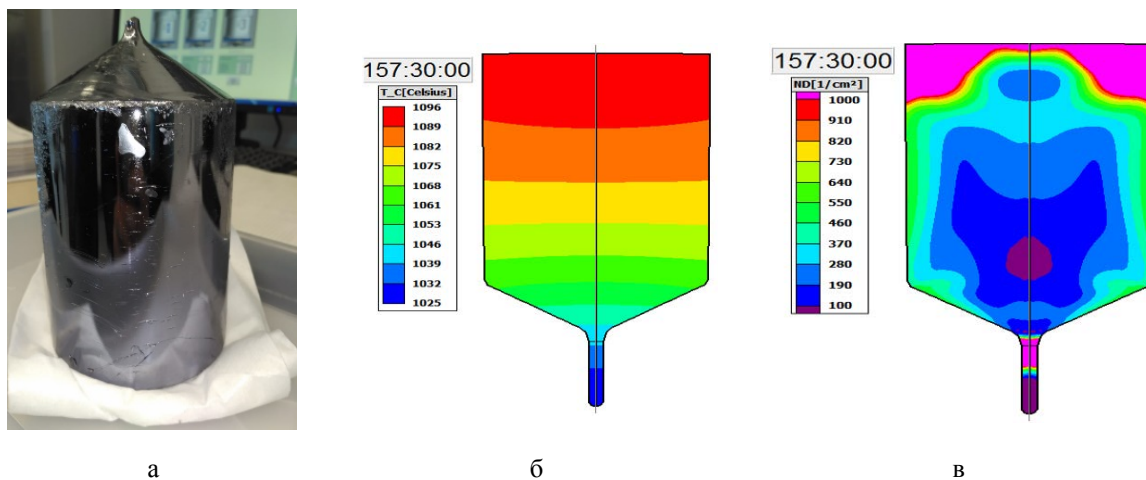


Рис. 3. Рост монокристалла: а) вид монокристалла, б) распределение температуры, в) распределение плотности дислокаций

Далее из монокристаллов изготавливаются подложки. Перед операцией резки монокристалла на подложки проводится проверка его степени чистоты (для исключения влияния примесей) и молекулярной ориентации монокристалла с помощью химического и рентгеноскопического анализов. Процесс резки заключается в разрезании монокристаллического слитка на тонкие (около миллиметра) плоскопараллельные пластины. Выделяют резку монокристалла на пластины с помощью диска с алмазной внутренней кромкой и резку проволокой с применением абразива.

Затем осуществляется рост гетероструктуры. Выделяют два метода выращивания гетероструктуры:

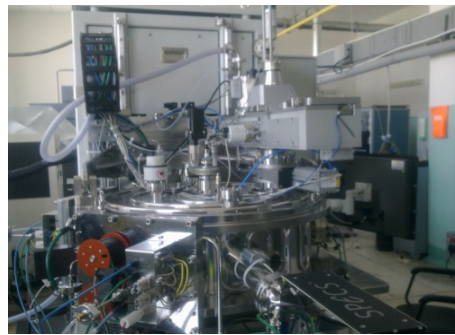
1) МOCVDMOC – гидридная эпитаксия. Метод заключается в осаждении металлоорганических соединений из газообразной фазы. Позволяет получать эпитаксиальные структуры полупроводников $A_{III}B_V$, $A_{II}B_{VI}$, твердых растворов на их основе (рис. 4,а);

2) МВЕ молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Состоит в осаждении испаренного молекулярном источнике вещества на подложку (рис 4,б).

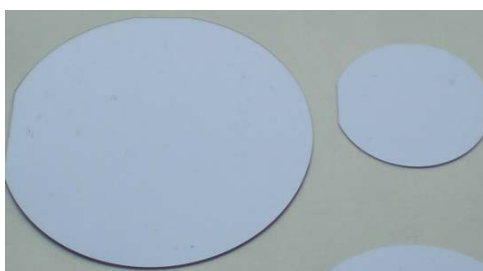
Готовая гетероэпитаксиальная пластина изображена на рис. 4,в.



а



б



в

Рис. 4. Установки для выращивания гетероструктуры: а) MOCVDMOC – гидридная эпитаксия, б) MBE молекулярно-лучевая эпитаксия, в) гетероэпитаксиальная пластина

В табл. 1 представлен пример слоев гетероэпитаксиальной пластины, полученной одним из рассмотренных методов.

Таблица 1

Параметры гетероэпитаксиальной пластины

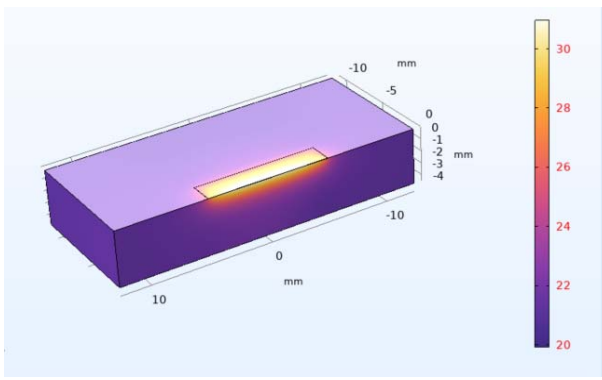
Layer #	Material	Mole fraction, x Specified (+/- 0.05)	PL, nm Specified (+/- 3 nm)	Thickness, μm Specified (+/- 10%)	CV doping level, cm^{-3} Specified (+/- 30%)
4	p-GaAs	-		0.26	$>2\text{E}19$
3	p-Al(x)GaInP	0.25		1.31	$1.2\text{E}18$
2	GaInP + QW	-	761	0.84	
1	n-Al(x)GaInP	0.25		1.33	$1\text{E}18$

Далее из гетероструктур необходимо получить индивидуальные излучатели. Это происходит на планарном цикле. В зависимости от требуемой архитектуры излучателя на различные области гетероструктуры наносят контакты, изоляторы и в дальнейшем разделяют на части. На грани наносят просветляющие и отражающие покрытия.

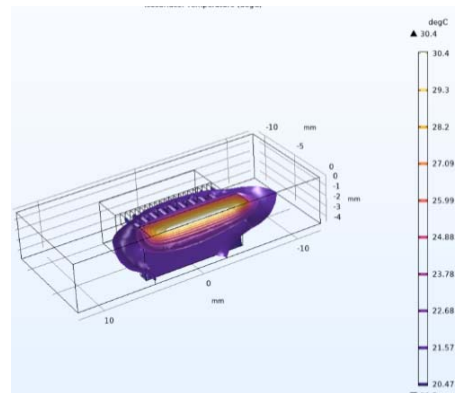
Далее необходимо установить лазерный кристалл с помощью операций сборки теплоотвод. Чаще всего это осуществляется при помощи пайки легкоплавкими припоями.

Как правило, приборы непрерывного режима работы имеют существенное тепловыделение – для примера у линеек с характерными размерами 10×3 мм оно может достигать 200 Вт. Особую роль начинает играть правильность теплового расчета теплоотвода.

Как пример, трехмерная модель растекания температурного потока на поверхности контактной пластины (теплоотвода) из меди со смонтированной линейкой лазерных диодов представлена на рис. 5,а. За реперную точку принята температура охлаждающей жидкости – воды, соответствующая 20°C . Согласно рис. 5,а температурный градиент направлен к источнику лазерного излучения, т. е. к области расположения линейки лазерных диодов. По мере приближения к ней перепад температур изменяется от 20°C до 31°C . Изотерма растекания теплового потока представлена на рис. 5,б.



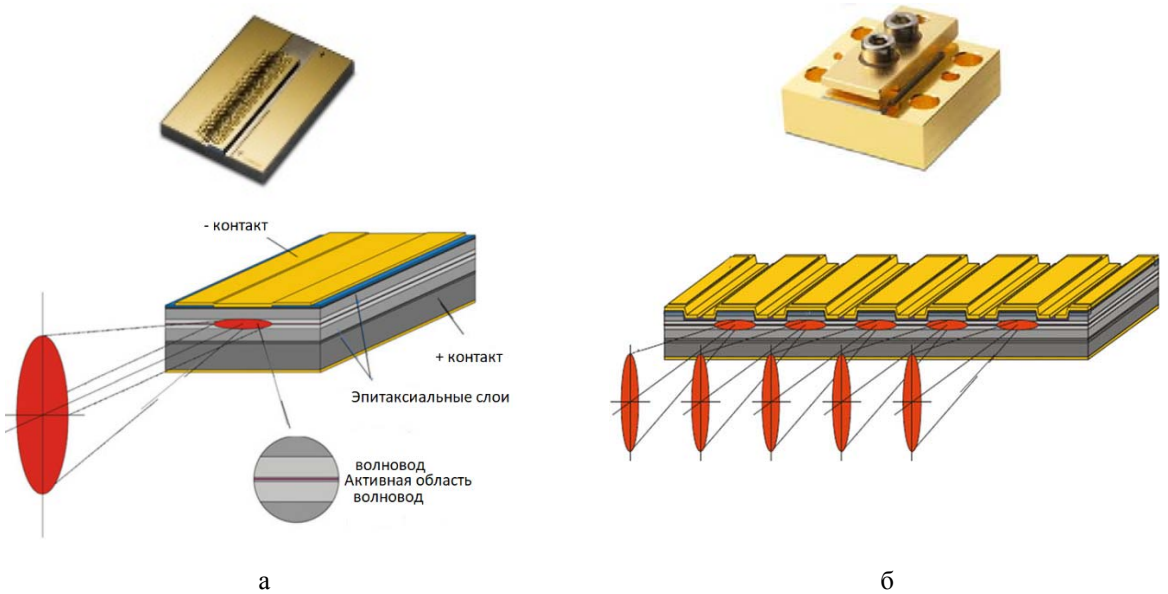
а



б

Рис. 5. 3D-модель растекания температурного потока на поверхности контактной пластины

Инжекционные лазеры в основном бывают двух видов: на основе одиночных излучателей (лазерного диода, смонтированного на сабмаунте – собранный чип) и линейки лазерных диодов (рис. 6).



а

б

Рис. 6. а – чип, б – линейка лазерных диодов

Собирая линейки лазерных диодов или одиночные лазерные диоды в различные сборки, можно получить широкий номенклатурный ряд приборов. Это как единичные корпусированные излучатели, линейки, наборы линеек, модули и т. д.

На сегодняшний день достигнутый уровень технологий в диапазоне длин волн 800-1060 нм показывает следующие результаты:

1. Для однокристалльных мощных диодных лазеров:
 - мощность излучения в непрерывном режиме 15–20 Вт при ширине эмиттера 100-200 мкм.
2. Мощность излучения для линеек с длиной 10 мм:
 - 100–200 Вт для непрерывного (CW) режима работы;
 - 300–800 Вт квазинепрерывного (QCW) режима.
3. Для набора линеек (матриц):
 - квазинепрерывного режима работы (QCW) до 10–12 кВт/см².

Сравнительные данные за прошлый и текущий периоды представлены в табл. 2 и табл. 3.

Результаты достигнутых технологий на данный момент для диапазона длин волн 800-1060 нм для одиночных излучателей, линейки лазерных диодов

	2019 г.	2022 г.
Мощность излучения в непрерывном режиме однокристалльных мощных диодных лазеров	8–15 Вт, при ширине эмиттера 90–100 мкм	15–20 Вт, при ширине эмиттера 100–200 мкм
Линеек с длиной 10 мм: непрерывного (CW) режима работы	100–150 Вт	150–200 Вт
Линеек с длиной 10 мм квазинепрерывного (QCW) режима работы	300–600 Вт	600–800 Вт

Таблица 3

Достигнутые значения выходной мощности излучения в модулях с волоконно-оптическим выводом

	2019 г.	2022 г.
Мощность излучения в непрерывном режиме при диаметре сердцевины волокна 105 мкм	150 Вт (1,7 МВт/см ²)	220–500 Вт (2,5–5,66 МВт/см ²)
Мощность излучения в непрерывном режиме при диаметре сердцевины волокна 135 мкм	200 Вт (1,4 МВт/см ²)	250 Вт (1,75 МВт/см ²)
Мощность излучения в непрерывном режиме при диаметре сердцевины волокна 200 мкм	500 Вт (1,6 МВт/см ²)	500–600–800 Вт (1,75 МВт/см ²)

В качестве примера приведем линейку лазерных диодов квазинепрерывного режима работы и лазерный диод непрерывного режима работы. Зависимость между мощностью излучения и током накачки (Вт/А) линейки лазерных диодов шириной 7 мм, с длиной резонатора 1,5 мм, с длиной волны 808 нм показана на рис. 7.

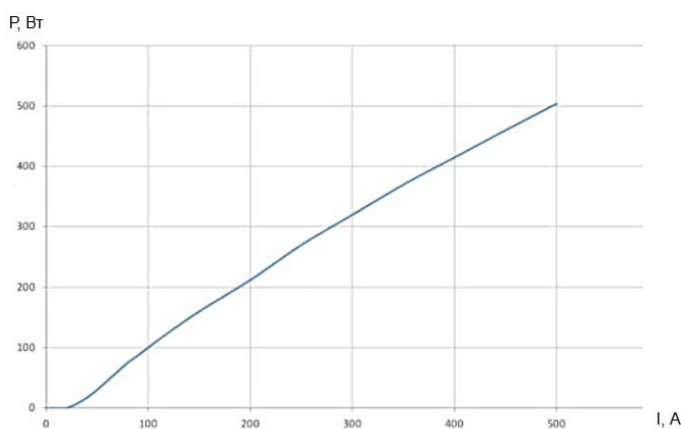


Рис. 7. Вт/А линейки лазерных диодов шириной 7 мм, с длиной резонатора 1,5 мм, с длиной волны 808 нм (QCW режим)

Применяя подобные линейки лазерных диодов, можно собирать решетки различных конфигураций. В качестве примера можно привести диодную накачку драйвера для термоядерного синтеза, показанную на рис. 8.

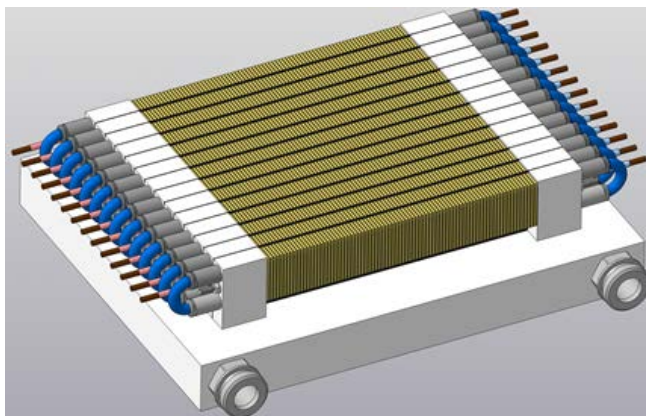


Рис. 8. Диодная накачка модуля драйвера для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС)

Мощность такой сборки составляет 200 кВт. Следует так же отметить, что повышение эффективности установки ЛТС возможно лишь при применении диодной накачки.

Примером одиночных лазерных диодов может служить излучатель, показанный на рис. 9.



Рис. 9. Лазерный диод, смонтированный на теплоотвод COS

ВтАХ и спектр излучения такого лазерного диода мощностью излучения 15 Вт, с длиной волны 976 нм, шириной области свечения 190 мкм, с длиной резонатора 4 мм представлены на рис. 10.

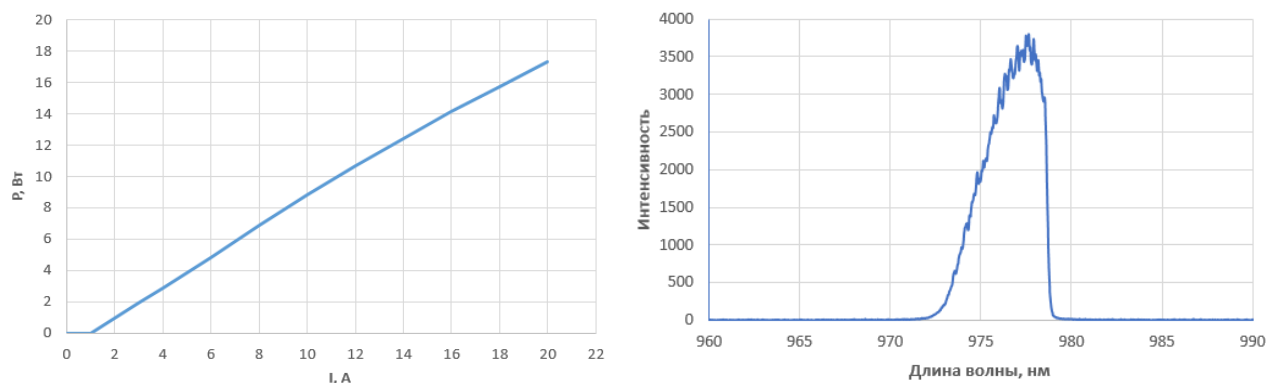


Рис. 10. ВтАХ лазерного диода и спектр излучения 15 Вт, 976 нм

Используя такие лазерные диоды, можно собирать различные лазерные модули. На рис. 11 представлено схематичное изображение одного такого модуля.

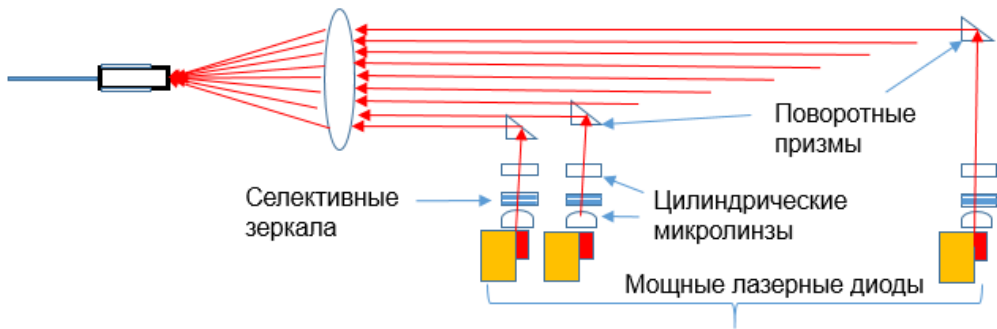


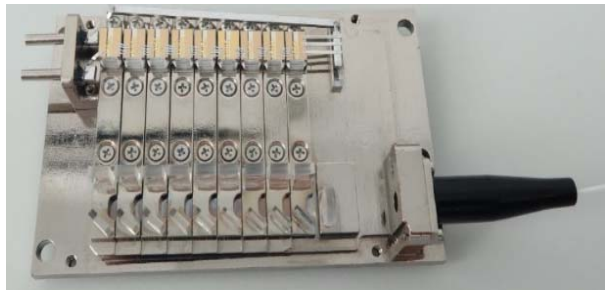
Рис. 11. Схема лазерного модуля на одиночных лазерных диодах

В таком приборе реализовано пространственное сложение излучения со вводом в волоконно оптическое волокно. Как опция может быть добавлена система стабилизации спектра излучения.

Внешний и внутренний вид типичного модуля накачки волоконного лазера, изготовленного на предприятии ООО «НПП «Инжект», в фирменном дизайне представлен на рис. 12.



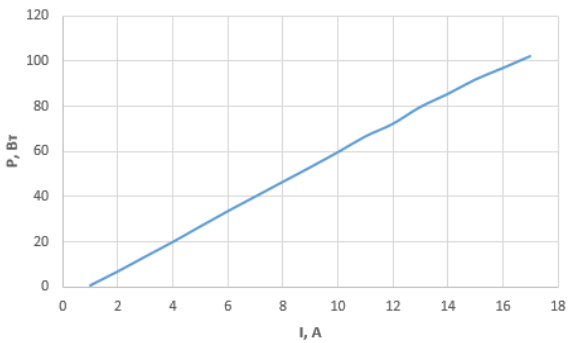
а



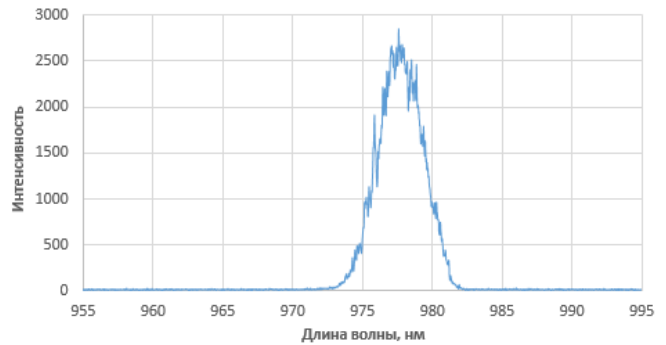
б

Рис. 12. Вид модуля накачки волоконного лазера, 100 Вт, 976 нм

Графики ВтАХ и спектра излучения модуля накачки волоконных лазеров мощностью излучения 100 Вт с длиной волны 976 нм представлены на рисунках 13, соответственно.



а



б

Рис. 13. а – ВтАХ и спектр излучения модуля накачки волоконных лазеров, 100 Вт, 976 нм

Подобные модули различных конфигураций применяются часто для накачки волоконных лазеров [3].

На основе модулей лазерных диодов, изготовленных из линеек лазерных диодов, возможно собирать установки прямого действия излучения для лазерной закалки материалов при металлообработке [4].

Таким образом, в настоящее время развитие лазерных технологий, в том числе разработка одиночных излучателей, линеек лазерных диодов, модулей накачки, лазерных установок прямого действия высокой мощности находятся на достаточно высоком уровне и постоянно совершенствуется. Так же следует отметить, что для развития энергетики будущего высокоперспективной областью применения диодной накачки является направление лазерного термоядерного синтеза.

Список литературы

1. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Попов Ю. М. Получение состояний с отрицательной температурой в р-п-переходах вырожденных полупроводников // ЖЭТФ. Т. 40, Вып. 6, 1961. С. 1879–1880.
2. Алферов Ж. И., Казаринов Р. Ф. Авторское свидетельство № 181737, заявка N 950840 с приоритетом от 30 марта 1963 г.
3. Панарин В. А. Лазерный диодный модуль высокой энергетической яркости с волоконно-оптическим выводом ЛМД-50 [Электронный ресурс] / Автайкин Д. А., Борисов Е. В., Великанов В. А., Галушка И. В., Кузнечихин А. В., Микаелян Г. Т., Панарин В. А., Соколов С. Н., Токарева Т. Д. // 9-й Международный семинар по волоконным лазерам. – 2020. – С. 164–165. – Режим доступа: <https://rfl20.iae.nsk.su/ru/articles.htm>.
4. Микаелян Г. Т. 6 кВт диодная лазерная технологическая установка и перспективы применения для обработки материалов / Автайкин Д. А., Куницкий А. И., Микаелян Г. Т., Миряха А. Н., Панарин В. А., Соколов С. Н., Шестак Л. И. // Материалы XVI международной конференции научно-технической конференции 15–16 октября 2019г. МАИ: Матер. Конф. – Москва : Пробел-2000, 2019. – 428 с.