

УДК 631.547.2

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ В САДОВОДСТВЕ

Даниил Игоревич Сафонов

магистр, инженер-исследователь

safonov.vim@gmail.com

Игорь Геннадьевич Смирнов

главный научный сотрудник, доктор технических наук, доцент

rashn-smirnov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

г. Москва, Россия

Аннотация. В статье исследуются перспективы использования диодных лазеров в садоводстве с акцентом на их преимущества перед традиционными лазерными системами. В условиях стремительного роста мирового рынка фотоники, достигшего 2,1 трлн долларов США в 2021 году лазерные технологии становятся актуальными в аграрной сфере, включая российский рынок, продемонстрировавший прирост на 19,57% в 2023 году. Это подчеркивает важность исследований в данном направлении для дальнейшего развития агротехнологий. Диодные лазеры выделяются рядом преимуществ, таких как высокая энергоэффективность (КПД 25–50%) и длительный срок службы (до 10 000 часов), что делает их привлекательными по сравнению с CO₂-лазерами и лазерами на свободных электронах, которые требуют значительных эксплуатационных затрат. Благодаря компактности (0,5–10 м²), диодные лазеры находят широкое применение в мобильных и роботизированных установках для садоводства, обеспечивая высокую маневренность в использовании. Экспериментальные исследования

эффективности диодных лазеров в борьбе с сорняками показали высокие показатели уничтожения различных видов растений: 81,25% для одуванчика, 93,75% для пырея и 75% для мальвы. Оптимальные параметры обработки были установлены на расстоянии 50 мм, а время воздействия составило 3,79 с для одуванчика, 1,06 с для пырея и 2,79 с для мальвы. Эти результаты подтверждают перспективность применения диодных лазеров для экологически безопасной и целенаправленной прополки в садоводстве. Несмотря на многочисленные преимущества, диодные лазеры в садоводстве имеют ограничения. Их выходная мощность (0,002-4 кВт) может быть недостаточной для задач, требующих высокой энергетической интенсивности, они чувствительны к обратному отражению, что требует дополнительной защиты и настройки системы, для эффективного воздействия на растения требуется точная настройка параметров лазерного излучения, что может усложнить процесс внедрения, диодные лазеры генерируют значительные тепловые нагрузки, требующие эффективного теплообмена и охлаждения. В статье рассматриваются дополнительные аспекты применения диодных лазеров в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: диодные лазеры, классификация лазеров, лазеры в садоводстве.

Введение. Лазерные технологии уже прочно вошли во многие сферы человеческой деятельности, оказывая влияние на медицину, информационные технологии, промышленность. Их использование постоянно расширяется, открывая новые возможности для оптимизации различных процессов. В медицине лазеры используются для проведения высокоточных хирургических операций, лечения заболеваний кожи и терапии различных патологий [1]. В информационной сфере они играют ключевую роль в передаче и записи информации, применяясь в оптических дисках, оптоволоконных сетях, лазерных принтерах и копировальных аппаратах [2]. В промышленности лазеры незаменимы для точной резки, сварки, маркировки, гравировки, термической обработки материалов, производства микрочипов, контроля качества продукции восстановления деталей [3].

В настоящее время особую актуальность приобретает использование лазерных технологий в сельском хозяйстве. Появление диодных лазеров, отличающихся высокой эффективностью, компактностью и доступностью, открывает новые горизонты для оптимизации сельскохозяйственных процессов.

Применение диодных лазеров в садоводстве может решить ряд актуальных задач, связанных с повышением урожайности, улучшением качества продукции и минимизацией влияния на окружающую среду.

Цель исследования – сравнительный анализ лазерных технологий, обзор возможностей применения и перспективы диодных лазеров в садоводстве.

Материалы и методы исследования.

Проведен анализ научной литературы, патентных документов и отраслевых отчетов, посвященных применению лазерных технологий. Классифицированы различные типы лазеров по основным параметрам, включая рабочую среду, форму выходной волны, длину волны. На основе предыдущих работ проведены экспериментальные испытания по применению диодных лазеров для решения актуальных задач в садоводстве, таких как лазерная прополка сорной растительности. Рассмотрены перспективные технологии

применения диодных лазеров для садоводства в совокупности с роботизированными платформами.

Результаты и обсуждение.

Самые свежие обзоры оценивают суммарный рост рынков за счёт использования фотоники в 2021г. в 2,1 триллиона долл. – рост на 40% за прошедшие 9 лет, что соответствует темпам годового роста в 3,9%. Фотоника создала более 5 млн рабочих мест. На рис 1-2 приставлена гистограмма динамики мирового рынка.

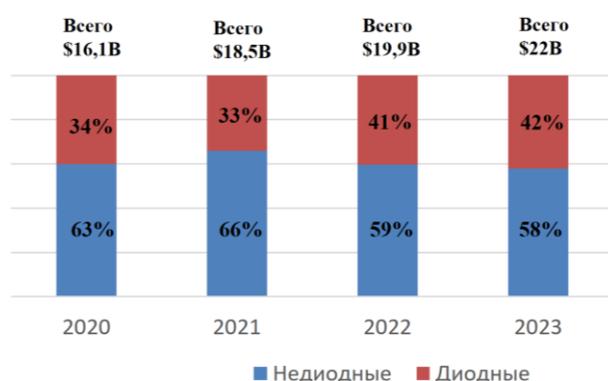


Рисунок 1 – Динамика мирового рынка лазеров 2020–2023 гг., \$ млрд.

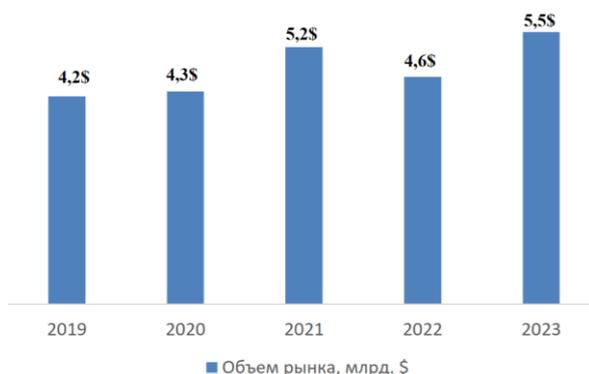


Рисунок 2 – Объем и темп прироста рынка лазеров в России в 2019 - 2023 гг., \$ млрд.

- 2020 год: рост на 2,38% по сравнению с 2019 годом.
- 2021 год: рост на 20,93% по сравнению с 2020 годом.
- 2022 год: снижение на 11,54% по сравнению с 2021 годом.
- 2023 год: рост на 19,57% по сравнению с 2022 годом.

Мировой рынок диодных лазерных модулей продемонстрировал значительный рост в период с 2017 по 2023 год. В 2017 году рынок оценивался

примерно в 5,1 млрд долларов. К 2022 году он вырос примерно до 8,03 млрд долларов, а в 2023 году его стоимость на уровне 8,9 млрд долларов [4].

Наиболее распространенным типом полупроводниковых лазеров являются инжекционные лазеры. В них накачка, то есть создание инверсной заселенности электронов и дырок, осуществляется путем инжекции носителей заряда в активную область. Простейшим примером инжекционного лазера является р-п переход, созданный путем контакта двух полупроводниковых кристаллов с различным типом проводимости, полученным путем легирования (добавления примесей). При подаче прямого напряжения на р-п переход электроны из n-области и дырки из р-области двигаются навстречу друг другу. В области перехода происходит рекомбинация электронов и дырок, сопровождающаяся излучением фотонов.

Для получения узкополосного (монохроматического) излучения лазерный диод оснащается оптическим резонатором, как правило, резонатором Фабри-Перо. Роль резонатора выполняет сам лазерный диод, торцевые грани которого специально обрабатываются для формирования зеркал [5].

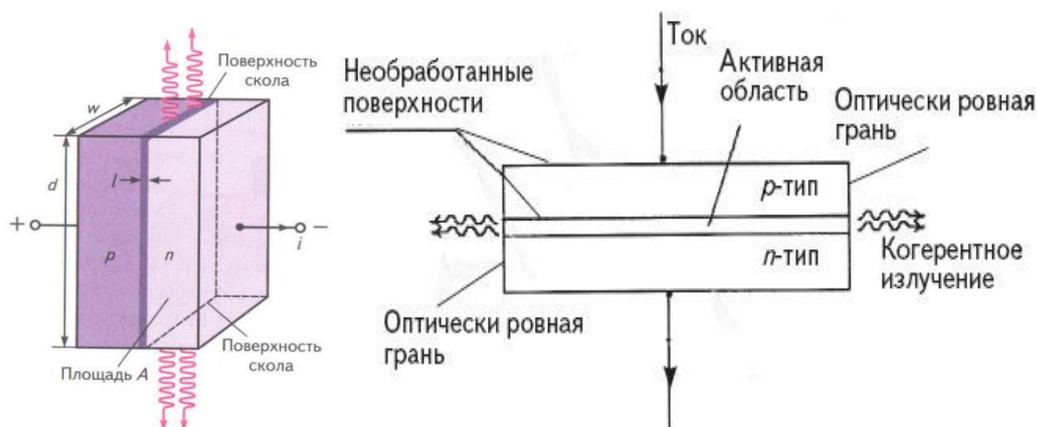


Рисунок 3 – Принцип устройства простейшего лазерного диода.

Растущий спрос на миниатюрные лазерные диоды является существенным движущим фактором роста рынка лазерных диодов. По мере развития технологий растет потребность в более мелких и компактных лазерных диодах, которые можно интегрировать в различные устройства, машины и приложения. Миниатюризация лазерных диодов позволяет включать

их в более мелкие электронные устройства, носимые технологии и портативные устройства без ущерба для производительности или эффективности.

Классифицировать лазеры можно по 4 группам. В таблице ниже представлена классификация лазеров.

Таблица 1

Классификация лазеров.

Рабочая среда	Форма выходной волны	Выходная длина волны	Мощность
1)Твердотельные лазеры 2)Волоконные лазеры 3)Газовые лазеры 4)Лазеры на красителях (жидкостные) 5)Химические лазеры 6)Полупроводниковые лазеры 7)Экимерные лазеры 8)Лазеры на свободных электронах	1)Лазер непрерывной генерации 2)Квази -КВ лазер 3)Импульсный лазер 3.1Миллисекундный 3.2Наносекундный 3.4Пикосекундный 3.4Фемтосекундный	1)Рентгеновские 2)Ультрафиолетовые 3)Видимые 4)Инфракрасные	1)Низкомощные – до 1 мВт 2)Среднемощные – от 1 мВт 3)Высокомощные – от 200 мВт до 2 кВт 4)Сверхмощные – от 2 кВт до 2 МВт 5)Экстремально высокоомощные – от 2 МВт до многих ТВт

По физическому воздействию на людей и окружающую среду лазеры квалифицируют:

Таблица 2

Классификация лазеров по физическому воздействию.

Наименование класса	Описание класса
1	Лазеры класса 1 безопасны для использования при всех разумно ожидаемых условиях использования. Это лазерное изделие или устройство, которое может включать в себя лазеры более высокого класса, лучи которых заключены в подходящий корпус, так что доступ лазерного излучения физически предотвращается, например лазерный принтер.
1M	Этот класс безопасен для просмотра невооруженным глазом, но может быть опасен для просмотра с помощью оптических инструментов. Если луч перефокусирован, опасность лазеров класса 1M может увеличиться, а класс продукта может быть изменен.
2	Лазеры класса 2 излучает в видимой области (400–700 нм).

	Предполагается, что естественной реакции отвращения к очень яркому свету будет достаточно, чтобы предотвратить вредное воздействие, хотя длительное наблюдение может быть опасным
2M	Это видимые лазеры. Этот класс безопасен для случайного просмотра невооруженным глазом, пока не преодолевается естественная реакция отвращения, как в случае с классом 2, но может быть опасен (даже при случайном просмотре) при просмотре с помощью оптических инструментов, как в случае с классом 1M
3R	Лазер класса 3R — это лазер непрерывного действия, который может производить излучение, в пять раз превышающее предел излучения для лазеров класса 1 или класса 2. Но риск получения травмы невелик. Лазер может производить не более 5 мВт в видимой области
3B	Лазер класса 3B излучает свет такой интенсивности, что прямой просмотр луча потенциально опасен. Диффузное излучение (т. е. то, что рассеивается от рассеивающей поверхности) не должно быть опасным. Непрерывное излучение таких лазеров на длинах волн выше 315 нм не должно превышать 0,5 Вт. Для импульсной лазерной системы класса 3B их выходная мощность не может превышать 125 мДж менее чем за 0,25 секунды.
4	Это высший класс лазерного излучения. На них всегда опасно смотреть, они могут привести к разрушительному и необратимому повреждению глаз, могут иметь достаточную энергию для воспламенения материалов и могут вызвать серьезные повреждения кожи. Уровни выходной мощности непрерывной волны класса 4 начинаются с 500 мВт, а для импульсных систем они могут производить более 125 мДж менее чем за 0,25 секунды

Проанализировав и испытав основные применяемые лазеры можно составить их характеристические параметры, приведённые в таблице 2 из которых следует, что диодные лазеры имеют высокую эффективность, высокую длительность службы, низкую стоимость на сами лазеры и их обслуживание, что расширяет масштаб их применения.

Таблица 3

Классификация характеристик лазеров.

Параметр	CO2	Химические лазеры	YAG:Nd с ламповой накачкой	YAG:Nd с диодной накачкой	Диодный лазеры	Волоконные лазеры	Лазеры на красителях	Лазеры на электронах
Выходная мощность, кВт	0,1-25	1-200	1-4	1-5	0,002-4	1-30	1-20	0,1 - 1000
Длина волны, мкм	9,4-10,6	2,7-10,6	1,064	1,064 - 1,03	0,3-1,5	1,06	0,42-0,94	0,000085-0,006
ВРР, мм x мрад	3-5	3	1-3	0,5-2	0,5	0,2	1 - 5	10
КПД, %	15-20	30	25	35	25-50	30-70	2-30	2-70
Стабильность выходной мощности,	высокая	средняя	высокая	высокая	высокая	очень высокая	низкая	средняя
Чувствительность к обратному отражению,	низкая	средняя	высокая	высокая	средняя	очень высокая	низкая	высокая
Занимаемая площадь, м ²	10-20	10-20	5-10	4-9	0,5-10	0,5-20	20-100	100-1000
Стоимость монтажа, отн.ед от 1 - 10	7	9	6	6	5	7	7	10
Стоимость эксплуатации, отн.ед от 1 - 10	6	8	6	6	5	6	6	10
Стоимость обслуживания, отн.ед от 1 - 10	7	8	6	6	5	6	6	10
Периодичность замены ламп, диодов, красителей, волокна, газовой смеси, оптических элементов, ч	5000	1000-5000	2000	10000	10000	10000-50000	3000	2000

С развитием технологий диодных лазеров для сельского хозяйства их применение является более подходящим выбором благодаря своей компактности, энергоэффективности, возможности точечного воздействия, стоимости и адаптивным спектральным характеристикам. Учитывая данные свойства диодных лазеров становится возможным проектировка компактных, многофункциональных технических средств для успешного выполнения агрозадач.

Исследуемые и предлагаемые технологии по применению диодных лазеров в садоводстве

1. Лазерная прополка сорной растительности на ранних стадиях вегетации пристволевой зоны плодовых насаждений
2. Облучение плодов садовых насаждений для предотвращения болезней
3. Облучение плодов, стволов, листьев, семян для контроля роста и развития культур, биостимуляция
4. Оптическая диагностики растений с применением когерентного излучения
5. Контроль насекомых-вредителей на плодах и листьях садовых насаждений

Биостимуляция роста растений с помощью диодных лазеров основана на воздействии низкоинтенсивного света, что приводит к активации фотосинтеза и повышению урожайности. Оптическая диагностика позволяет проводить мониторинг состояния растений, выявляя заболевания на ранних стадиях и оптимизируя условия выращивания.

Диодные лазеры известны своей высокой электрооптической эффективностью. Это означает, что они преобразуют большее количество электрической энергии в лазерное излучение, чем другие типы лазеров. Это приводит к снижению энергопотребления и, соответственно, к более низким эксплуатационным затратам. Диодные лазеры обладают небольшими

размерами и легким весом, что делает их удобными для мобильного применения и интеграции в различные системы, что идеально подходит для сельского хозяйства. Диодные лазеры имеют долгий срок службы, что делает их надежными для длительной эксплуатации без частой необходимости замены или технического обслуживания. По сравнению с другими лазерами диодные лазеры дошли до такой популяризации и массовости что их стоимость может начинаться от нескольких тысяч рублей, но за эту стоимость они могут раскрыть пути решения реальных технологических проблем. Диодные лазеры могут работать на различных длинах волн, что позволяет их использование для разных задач в сельском хозяйстве. На данный момент, минимальная длина волны, достигнутая для диодных лазеров, находится в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, около 280 нм. Максимальная длина волны для диодных лазеров дальний инфракрасный (ДИК) диапазон, доходящий до 10 мкм.

В предыдущей работе была доказана эффективность применения диодных лазеров для прополки растений «Статистическая оценка полученных данных выполненного эксперимента показала эффективность применения диодных лазеров в сельском хозяйстве для удаления сорных растений. Выявили оптимальный режим работы диодного лазера для удаления сорной растительности, при котором полное срезание стебля необязательно. Достигается результат за счет нагрева и повреждения тканей, что ведет к нарушению обмена веществ в сорном растении. Для одуванчика оптимальные параметры – расстояние 50 мм до объекта воздействия, при толщине стебля в 3,496 мм процесс выжигания занимает 3,792 с; для пырея ползучего – расстояние 50 мм, при толщине стебля 0,5 мм процесс выжигания займет 1,06 с; для мальвы приземистой – расстояние 50 мм, при толщине стебля 2,992 мм процесс выжигания займет 2,79 с. Полученные математические модели при константных расстояниях 100 и 150 мм до объекта обработки позволили определить эффективные режимы работы диодного лазера для различных условий эксплуатации. Из всех образцов, участвовавших в проведении

экспериментов, 81,25% одуванчика, 93,75% пырея и 75% мальвы уничтожены, что показывает эффективность применения лазерного излучения.» [6]

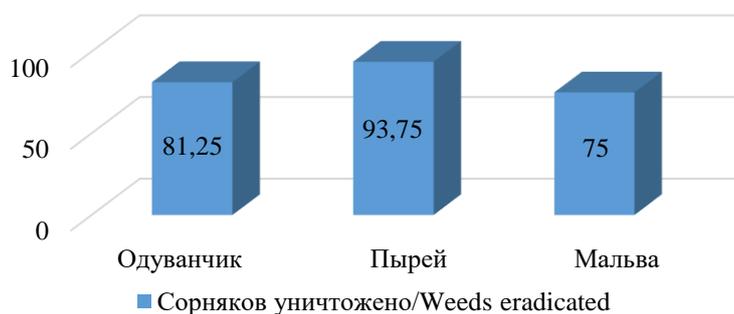


Рисунок 4 – Количественная оценка убитых сорняков.

Для удаления сорной растительности, а также других агропроцессов и иных исследований, в сфере применения диодных лазеров, предлагается установка на роботизированную платформу для дальнейшего проведения полевых испытаний [7, 15 - 17].

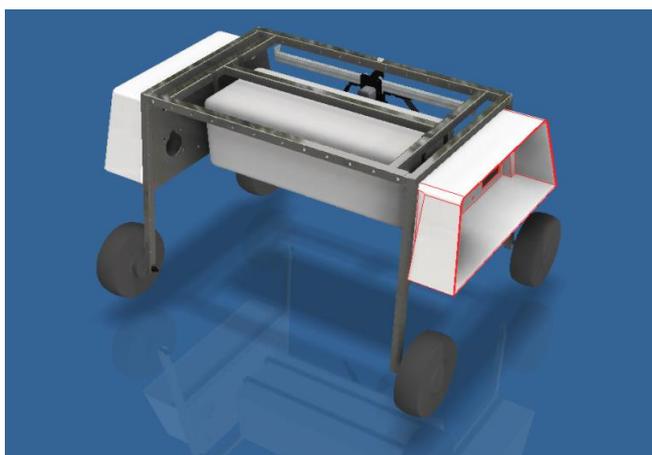


Рисунок 5 – Модель роботизированной установки.

Выводы: Задача выбора лазерной аппаратуры является актуальной и комплексной. От используемой компонентной базы зависит точность, скорость, эффективность, качество процесса (конечного изделия) и безопасность людей и окружающих объектов в целом. Проведенное исследование подтвердило перспективность использования диодных лазеров в садоводстве и сельском хозяйстве. Диодные лазеры обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими типами лазеров: высокая эффективность и низкое энергопотребление КПД которых достигает 25–50%, что превышает показатели большинства других типов лазеров (например, КПД CO₂-лазеров составляет

15–20%). Это снижает затраты на энергию и эксплуатацию, делая использование диодных лазеров экономически выгодным. Диодные лазеры имеют небольшие размеры и вес, занимая площадь от 0,5 до 10 м², что значительно меньше по сравнению с СО₂-лазерами (10–20 м²) или лазерами на свободных электронах (100–1000 м²). Это облегчает их интеграцию в мобильные и роботизированные платформы для применения в поле. Периодичность замены компонентов у диодных лазеров составляет около 10 000 часов, что превосходит многие другие типы лазеров. Стоимость монтажа, эксплуатации и обслуживания у них также ниже, что делает их более доступными для сельскохозяйственных предприятий. Возможность настройки на различные длины волн (от 0,3 до 1,5 мкм) позволяет использовать диодные лазеры для решения разнообразных задач, включая лазерную прополку, обработку растений для предотвращения болезней, оптическую диагностику, контроль насекомых-вредителей, анализ почвы - лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, биостимуляция плодов, семян, стволов.

Сравнительный анализ показал, что диодные лазеры превосходят другие типы лазеров по ряду ключевых параметров, важных для сельского хозяйства. Например, СО₂-лазеры и химические лазеры, несмотря на высокую выходную мощность, являются слишком громоздкими и дорогостоящими для применения в садоводстве. Волоконные лазеры близки по характеристикам к диодным, однако они обычно имеют более высокую стоимость, как самой аппаратуры, так монтажа и обслуживания.

Однако существуют и недостатки, которые необходимо учитывать: диодные лазеры обычно имеют выходную мощность от 0,002 до 4 кВт, что может быть недостаточно для некоторых задач, требующих более высокой энергии воздействия, диодные лазеры имеют среднюю чувствительность к обратному отражению, что требует дополнительной защиты и настройки системы для предотвращения повреждений лазера. Так же не маловажным аспектом для диодных лазеров является поддержание нужной температуры

лазерного диода, данный тип лазеров имеет склонность к высоким тепловым нагрузкам, что в свою очередь требует хорошего теплообмена и охлаждения. Использование лазеров требует соблюдения строгих мер безопасности для предотвращения потенциального вреда операторам и окружающей среде.

Список литературы:

1. Шангина О.Р., Гайнудинова Р.Д. Взаимодействие лазерного излучения с биологическими тканями. Практическая медицина. 2019. Том 17. № 1. С.24-27
2. Мелешенко Д. Ю., Пиганов М. Н. Полупроводники для оптоэлектроники // Научный аспект. 2023. № 5. С. 3295 - 3299. Т. 26.
3. Рассказчиков Н. Г., Полякова А. А. Исследование процесса лазерной маркировки и его оптимизация // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2019. Т. 7. № 1. С. 9-13.
4. Laser Focus World. Лазер информ. 2023. Т. 738. № 3. С. 1-6
5. Минаев И. В., Сергеев А. Н., Кубанова А. Н., Добровольский Н. М., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Малий Д. В. История развития лазера и особенности его применения // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 4. С. 423–438
6. Сафонов Д.И., Смирнов И.Г., Кутырёв А.И., Мирзаев М.А. Анализ применения лазерного излучения для контроля сорной растительности // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71.
7. Кутырёв А.И., Дышеков А.И. Разработка системы управления движением роботизированной платформы на основе методов лазерной дальнометрии (LiDAR). Агроинженерия. 2023. 25(2). С.19-27.
8. С. Вудс. Промышленные лазеры для обработки материалов. Фотоника. 2012. №2 /32. С.56 -64
9. Фокин А. В. Изучение лазерного излучения. Физика, 8, Спецвыпуск. 2009. С. 16 - 30.

10. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Гончаров Н.Т., Лужнова Е.С. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 3. С. 4-11.

11. Артюшин А.А., Смирнов И.Г. О нормативно-правовой базе использования глонасс в сельском хозяйстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 6. С. 11-13.

12. Шаховой Р. А. Динамика полупроводниковых лазеров / Санкт-Петербург: Лань. 2024. ISBN 978-5-507-48267-2

13. Брокманн. Р. Диодные лазеры – экономическое чудо // Фотоника 4/2009. С. 8-11

14. Белов М. Л., Булло О. А., Федотов Ю. В., Городничев В. А. Лазерный метод контроля состояния растений // Приборы и методы измерений. 2015. № 3.

15. Khort D., Kutryev A., Smirnov I., Osypenko V., Kiktev N. Computer vision system for recognizing the coordinates location and ripeness of strawberries // Communications in Computer and Information Science. 2020. Т. 1158. С. 334-343.

16. Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств / Н. А. Майстренко, В. П. Уваров, А. Г. Левшин и др. // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. № 4. С. 637-658.

17. Унифицированная модель расчетов производительности технических средств при реализации транспортных и транспортнотехнологических операций / О. С. Воротникова, Н. А. Майстренко, А. Г. Левшин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. № 2. С. 75-80.

UDC 631.547.2

PROSPECTS OF DIODE LASERS USE IN HORTICULTURE

Daniil Ig. Safonov

master's degree, research engineer

safonov.vim@gmail.com

Igor G. Smirnov

chief researcher, doctor of technical sciences, associate professor

rashn-smirnov@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM

Moscow, Russia

Abstract. The article explores the prospects of using diode lasers in horticulture with a focus on their advantages over traditional laser systems. With the rapid growth of the global photonics market, which reached \$2.1 trillion in 2021 and created more than 5 million jobs, laser technologies are becoming relevant in the agricultural sector, including the Russian market, which demonstrated a 19.57% growth in 2023. This emphasises the importance of research in this area for the further development of agro-technology. Diode lasers offer several advantages such as high energy efficiency (25-50% efficiency) and long lifetime (up to 10,000 hours), which makes them attractive compared to CO₂ lasers and free electron lasers, which require significant operating costs. Due to their compact size (0.5-10 m²), diode lasers are widely used in mobile and robotic horticultural applications, providing high manoeuvrability and flexibility of use. Experimental studies on the effectiveness of diode lasers in weed control have shown high kill rates for different plant species: 81.25% for dandelion, 93.75% for wheatgrass and 75% for mallow. The optimum treatment parameters were set at a distance of 50 mm and the exposure time was 3.79 s for dandelion, 1.06 s for wheatgrass and 2.79 s for mallow. These results confirm

the promising application of diode lasers for environmentally safe and targeted weeding in horticulture. Despite the numerous advantages, diode lasers in horticulture have limitations. Their output power (0.002-4 kW) may not be sufficient for tasks requiring high energy intensity, they are sensitive to back reflection which requires additional protection and system tuning, precise tuning of laser emission parameters is required to effectively target plants which can complicate the implementation process, diode lasers generate significant thermal loads requiring efficient heat exchange and cooling. The article discusses additional aspects of diode laser applications.

Key words: diode lasers, classification of lasers, lasers in horticulture.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.