

АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

В данной статье рассматривается проблема экологических аспектов в технологии изготовления электронных приборов с использованием лазерного и инфракрасного нагрева

Введение

Современный переход к парадигме «Индустрии 5.0» требует от производителей электроники не просто автоматизации, а глубокой интеграции принципов «зеленого» производства. Главные инженеры-экологи рассматривают внедрение технологической связки наносекундного ультрафиолетового (УФ) волоконного лазера IPG ULPN-355-10-1-3-M [1] и керамического инфракрасного (ИК) излучателя Elstein SHTS/4 [2] как стратегический шаг к декарбонизации производства.

Данная комбинация систем позволяет полностью исключить из технологического цикла экологически агрессивное «мокрое» химическое травление, требующее использования токсичных реагентов, таких как плавиковая и азотная кислоты, а также огромных объемов воды для нейтрализации стоков. Прецизионные бесконтактные методы заменяют и механическую обработку, устраняя необходимость в смазочно-охлаждающих жидкостях и снижая количество твердых отходов [3][4].

I. Сравнительный анализ энергетической эффективности

Энергоэффективность (Wall-Plug Efficiency, WPE) является ключевым показателем для оценки устойчивого развития. Волоконные технологии IPG Photonics демонстрируют технологический разрыв с традиционными источниками.

Сравнительный анализ КПД лазерных систем:

- Волоконный лазер IPG: КПД преобразования энергии составляет от 40% до 57% [3].
- Традиционный Nd:YAG лазер: КПД около 2% [3].
- Газовый CO₂-лазер: КПД составляет всего 7–8% [3].

Расчет экологического эффекта: При эксплуатации лазера ULPN-355 мощностью 10 Вт вместо Nd:YAG-аналога годовая экономия электроэнергии (при графике 8ч/280 дней) составляет ~1070 кВт·ч на одну установку. Это эквивалентно предотвращению выброса 428 кг CO₂ в год.

Эффективность ИК-нагревателя Elstein SHTS/4: Излучатели серии SHTS производятся методом полного керамического литья с заполнением внутренней полости термозоляционным материалом. Благодаря позолоченному покрытию задней стенки, работающему как высокоэффективный отражатель, более 75% подводимой энергии передается непосредственно материалу [4]. Это обеспечивает экономию до 25% энергии по сравнению со стандартными полноте-

лыми панелями и позволяет реализовать концепцию «холодной печи» в цехе.

II. Экологические преимущества метода «холодной абляции»

Физика взаимодействия УФ-излучения с длиной волны 355 нм основана на высокой энергии фотонов [1]. Эта энергия достаточна для прямого фотохимического разрыва межмолекулярных связей C-C и C-H, что позволяет осуществлять абляцию без фазы плавления. В качестве примера экологически чистого применения можно выделить микро сверление кварца, где достигается минимальная зона термического влияния (HAZ) и отсутствие термических напряжений [5].

Неизбежным продуктом химического травления является токсичный шлам, а при механической отработке абразивы, что является значительно более опасными загрязнителями чем микропыль от применения лазера. Помимо этого механические методы используют приточную воду для охлаждения, а новая система может охлаждаться воздушно, что исключает из процесса воду. Пятно фокусировки лазера составляет всего 10 мкм, обеспечивая высокую точность обработки и не имеет физических ограничений износа инструмента.

III. Соответствие международным экологическим стандартам (RoHS и REACH)

Безопасность элементной базы является приоритетом при сертификации по стандартам ISO 13485.

- Директива RoHS: В компонентах систем полностью отсутствуют свинец (Pb), ртуть (Hg), кадмий (Cd) и шестивалентный хром (Cr^{VI}) [6]. Специализированная черная глазурь Elstein термически стабильна до 900 °C и не выделяет токсичных паров.
- Регламент REACH: В изоляции кабелей и нелинейных кристаллах отсутствуют вещества из списка SVHC (например, фталаты).
- Производство отражателей: Нанесение золотого покрытия на SHTS/4 выполняется с использованием бесцианистых электролитов и систем нулевого сброса (Zero Liquid Discharge), что снижает экологические риски на 99.1% [7].

IV. Управление жизненным циклом и директива WEEE

Ресурсная устойчивость и редкоземельные металлы (REE): Активная среда лазера содержит Иттербий (Yb), добываемый из минералов гадолинита и монацита [8]. Несмотря на экологическую сложность добычи REE, воздействие минимизируется за счет

долговечности диодов накачки (ресурс более 200 000 часов) [9].

Иерархия рециклинга компонентов:

- Драгоценные металлы: Золото (Au) с тыльной стороны нагревателей извлекается с чистотой >90%.

- Цветные и черные металлы: Al, Cu и сталь перерабатываются на 98%.

- Керамика: Отработанные панели Elstein дробятся для производства новых огнеупоров (муллита).

Специальная утилизация кристаллов: Нелинейные кристаллы LBO/VBO требуют герметичной утилизации из-за содержания бария. Использование лазеров IPG позволило сократить выбросы CO_2 на 10 млн тонн в 2022 году [10]. Иерархия рециклинга: REE-содержащие отходы электроники рассматриваются как вторичный ресурс [11]. Критически важным фактором их долговечности является чистота производства: микрочастицы SiO_2 и наночастицы SiO_2 , остающиеся в полировочном слое после химико-механической полировки, выступают как «предвестники повреждений» (precursors), поглощая УФ-излучение [12].

V. Охрана труда и техносферная безопасность

Эксплуатация должна соответствовать стандарту IEC 60519-1.

- Фильтрация: При абляции полимеров и металлов необходимо использование систем экстракции с НЕРА-фильтрами (эффективность 99.97% для частиц 0.3 мкм) для улавливания ЛОС и мелкодисперсной пыли.

- Специфические риски: При обработке стали марки S355 лазером существует риск выделения гексавалентного хрома (Cr^{VI}), что требует строгого контроля фильтрующих элементов.

- Оптическая и термическая безопасность: Требуется использование СИЗ органов зрения с оптической плотностью $OD > 6$ для длины волны 355 нм. Нагреватель SHTS/4 обладает высокой инерционностью: остывание до безопасных 200°C занимает 10 минут.

VI. Выводы

Синергетический эффект связки IPG и Elstein обусловлен не только высоким КПД (>50% для лазера

и >75% для нагревателя), но и созданием «холодной» рабочей среды. Это позволяет интегрировать системы высокоточной термической метрологии непосредственно в процесс, реализуя цели Smart Manufacturing. Переход на безводное охлаждение и полное исключение жидких химикатов делает данную технологическую связку эталоном экологической безопасности в эпоху Индустрии 5.0.

Список литературы

1. Nanosecond laser – ULPN-355-M series – IPG Photonics Corporation [Электронный ресурс] // DirectIndustry. – Режим доступа: <https://www.directindustry.com/prod/ipg-photonics-corporation/product-15102-1616744.html>.
2. Ceramic Infrared Panel Heaters SHTS – Elstein-Werk : Data Sheet. – Version 003. – 6 p.
3. IPG Innovation Drives Sustainability [Электронный ресурс] // IPG Photonics Corporation. – Режим доступа: <https://www.ipgphotonics.com/technology/ipg-innovation>.
4. Elstein SHTS-4: Infrared Panel Heater [Электронный ресурс] // Thermon Africa. – Режим доступа: <https://www.thermon.co.za/elstein-shts-4-infrared-panel-heater>.
5. Sen, A. An experimental investigation into fibre laser micro-drilling of quartz / A. Sen, B. Doloi, B. Bhattacharyya // Jan 2018.
6. STC RoHS Compliance Statement [Электронный ресурс] // Superior Technical Ceramics. – Режим доступа: <https://ceramics.net/stc-rohs-compliance-statement>.
7. What are the impacts of electroplating on the environment? [Электронный ресурс] // Superb Heater Group Limited. – Режим доступа: <https://www.superheater.com/knowledge/environmental-impacts-of-electroplating>.
8. Exploring the Uses of Ytterbium: A Key Element Driving Innovation Across Industries [Электронный ресурс] // AEM. – Режим доступа: <https://www.aemree.com/news/exploring-the-uses-of-ytterbium>.
9. Single-Emitter Diodes [Электронный ресурс] // IPG Photonics Corporation. – Режим доступа: <https://www.ipgphotonics.com/technology/single-emitter-diodes>.
10. IPG Photonics' path to emission reduction: analyzing targets and achievements [Электронный ресурс] // Verdict. – Режим доступа: <https://www.verdict.co.uk/ipg-photonics-net-zero-targets/>.
11. Royen, H. Rare Earth Elements – Purification, Separation and Recycling : Technical Report / H. Royen, U. Fortkamp. – Sep 2016.
12. Liu, Q. Investigation of UV laser-induced damage by precursors at the surface of LBO crystal / Q. Liu [et al.] // Journal of the Optical Society of America B. – 2014. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 189-194.

Ларпо Александр Игоревич, ст. преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем БГУИР, lappo@bsuir.by

Гарифуллин Арсений Альфредович, студент 2 курса, специальность АСОИ, группа 420603, БГУИР