

# ЛАЗЕРНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА

## В МЕДИЦИНЕ, ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭКОЛОГИИ

Исследование явления флуоресценции в биологических объектах микробной природы, индуцированно лазерным излучением, позволило разработать универсальный метод экспресс-диагностики состояния этих объектов. Методически, метрологически и аппаратно обоснованная лазерная флуоресцентная диагностика (ЛФД) удостоена в 2002 году Государственной премии РФ.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАЗЕРНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Сегодня для диагностики и индикации различных процессов микробной природы применяются традиционные микробиологические, иммунологические и биохимические методы исследования. Физические и физико-химические методы (хроматографические, масс-спектрометрические и др.) дороги, требуют дополнительных реагентов и используются в основном в качестве вспомогательных методов ограниченного применения.

Микробиологические методы, при том что они иногда довольно сложны и дороги, требуют, как правило, еще и длительного времени, что не всегда удовлетворяет требованиям клиницистов. В частности, идентификация анаэробных бактерий, составляющих до 40–70% микрофлоры гнойной раны, усложняется в значительной мере длительностью (до 7–10 дней) их культивирования. Кроме того, из всей совокупности бактерий в настоящее время удается идентифицировать не более 40–50%, остальные же виды бактерий – некультивируемые. Усугубляет положение и отсутствие (или



Рис.1. Внешний вид диагностической установки ЛЭСА-6

М.Александров, А.Воробьев,  
Е.Пашков, М.Филатов,  
И.Мищенко, Г.Багранова

практическое отсутствие) в терапевтических, хирургических, стоматологических, дерматологических и других клиниках методов и аппаратуры для адекватной патологическому процессу экспресс-диагностики.

В связи с этим авторы обратились к созданию методов экспресс-диагностики процессов микробной природы, в частности гнойно-воспалительных заболеваний, пищевых биотехнологий и экологии, на основе явления флуоресценции. Этот подход представляется перспективным для индикации микроорганизмов, поскольку многие вещества, участвующие в метаболизме микробных клеток, обладают характерными спектрами поглощения и флуоресценции.

Спектральные исследования проводили на экспериментальном лазерном волоконном многоканальном спектроанализаторе (рис.1), который работает следующим образом (рис.2). Лазерный луч от источника излучения (гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм) по гибкому световоду подводится к исследуемому объекту. При взаимодействии лазерного излучения длиной волны 633 нм с биологической тканью возникает отраженное от ее поверхности излучение и индуцированная лазером флуоресценция в диапазоне от 633 до 1000 нм. Это вторичное излучение воспринимается приемными световодами, составляющими единый волоконно-оптический кабель с осветительным световодом, и поступает в полихроматор. После плоской дифракционной решетки со спектральным разрешением 3 нм диспергированный свет попадает на многоканальный фотодетектор из линейки 1024 диодов, область спектральной чувствительности которого 300–1100 нм. С помощью специального ПО компьютера полученные данные обрабатываются и отображаются на его мониторе в виде спектра. Процесс экспресс-диагностики занимает не более минуты и даже секунды.

При использовании спектроанализатора незначительные изменения параметров лазерного излучения, приемных устройств и отдельных узлов оптической системы заметно влияют на форму спе-

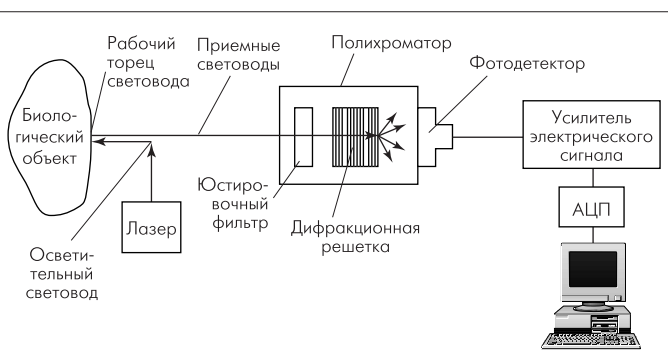
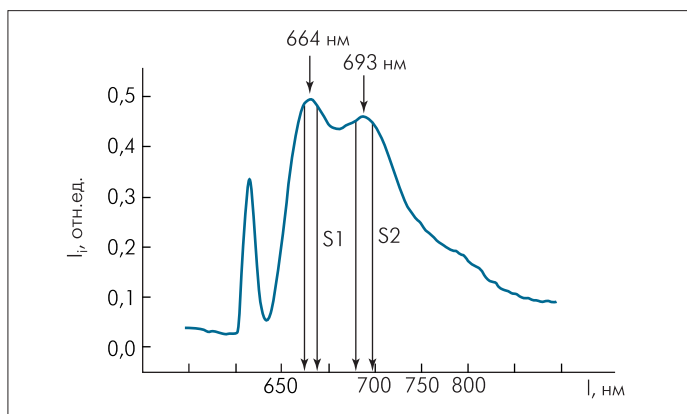


Рис.2. Блок-схема лазерного спектроанализатора



**Рис.3. Спектр флуоресценции**

ктральных кривых флуоресценции, а следовательно, и на конечный диагностический результат. Поэтому особое внимание уделяется амплитудно-спектральной калибровке показаний прибора. Перед проведением каждой серии измерений необходимо тестировать все блоки системы и проводить ее юстировку при комнатной температуре и нормальной влажности. При этом минимальная мощность зондирующего излучения на торце световода составляет 3–5 мВт, максимальная – 20–30 мВт. Калибровка экспериментальной установки проводится следующим образом: перед началом измерений с целью избавления от собственных шумов спектрометра снимается спектр сигнала, отраженного от абсолютно черного тела, который затем вычитается из измеряемых значений для получения реального спектра флуоресценции.

Для получения достоверных данных об исследуемом объекте необходимо иметь четкое представление о его характеристиках поглощения, рассеяния, а также о вероятной концентрации в нем тех или иных флуоресцирующих веществ.

Основной, наиболее удобный и часто используемый диагностический критерий при исследованиях *in vivo* (в объекте, в организме), – интегральная спектральная интенсивность флуоресценции

$$\int_{634}^{850} I(\lambda) d(\lambda).$$

При исследовании особенностей спектральных характеристик исследуемых объектов было обнаружено наличие двух характерных пиков: первый – на 664 нм, второй – на 693 нм (рис.3). Для дальнейшего анализа использовалось соотношение интенсивностей флуоресценции на этих двух длинах волн. С целью избавления от шумов, которые неизбежно присутствуют при измерениях спектров слабой интенсивности, использовались не просто амплитуды на этих длинах волн, а интегралы в окрестности 5 нм:

$$S1 = \int_{660}^{670} I_i(\lambda) d(\lambda),$$

$$S2 = \int_{690}^{700} I_i(\lambda) d(\lambda).$$

Для дальнейших исследований и оценки вклада в спектр этих двух составляющих дополнительно использовалось соотношение:

$M = S1/S2$  и мощность флуоресценции в относительных единицах –  $I, \text{отн.ед.}$

Опыт показывает, что работа по изучению диагностических возможностей регистрации интенсивности флуоресценции биологических объектов, ввиду большого количества разнообразных параметров, может наиболее успешно проходить лишь при наличии специально созданной базы данных, структура и математическое обеспечение которой соответствовали бы определенным целям исследования. Поэтому наряду с алгоритмизацией процесса и статистического анализа данных была создана база данных и СУБД.

### ПРИМЕНЕНИЕ ЛФД В МЕДИЦИНСКИХ БИОТЕХНОЛОГИЯХ

Определение закономерностей флуоресценции микроорганизмов в чистых и смешанных культурах явилось экспериментально-теоретическим обоснованием клинического применения метода ЛФД для выявления микробов и вызываемых ими процессов, экспресс-диагностики гнойно-воспалительных заболеваний различной этиологии и локализации, дисбиозов желудочно-кишечного тракта, кариеса, оценки гигиенического состояния зубов и полости рта.

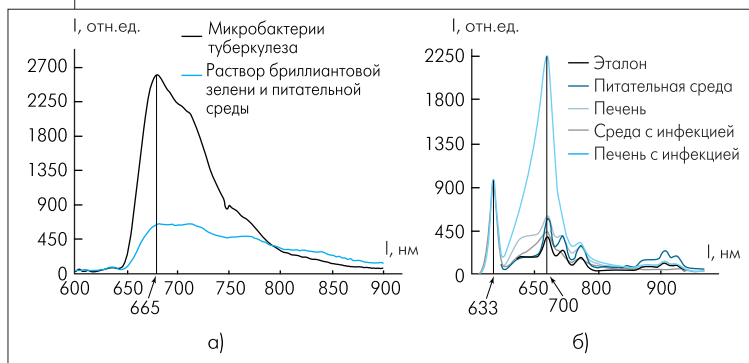
**В области клинической микробиологии** разработана методика и программный продукт для регистрации собственной флуоресценции микрофлоры человека при возбуждении ее излучением He-Ne-лазера и регистрации спектра флуоресценции в красном-инфракрасном спектральном диапазоне. Впервые изучены спектры флуоресценции 52 представителей микрофлоры, которые показали, что интегральная интенсивность флуоресценции культур микробов линейно зависит от их концентрации в исследуемом биологическом объекте. Высокая чувствительность метода позволяет оценивать концентрации бактерий от  $10^{16}$  до 10 на 1 мл исследуемого биологического субстрата.

Выявлено, что различные виды микроорганизмов различаются не только по интегральной мощности флуоресценции, но и по показателям  $M$  и  $I, \text{отн.ед.}$ . Все изученные спектры имеют характерные пики флуоресценции на длине волны 665 и 700 нм. Эффективность ЛФД иллюстрируют кривые флуоресценции возбудителей туберкулеза и сифилиса на рис.4.

Проведенные исследования обосновывают возможность применения метода ЛФД для экспресс-диагностики и оценки эффективности лечения и прогнозирования течения заболеваний микробной этиологии.

**В области дерматологии** результаты исследования микробной обсемененности флуоресцентным методом совпадают с аналогичными показателями микробиологического метода и применяются для оценки типов кожи, диагностики и прогнозирования дерматологических заболеваний и косметических процедур.

**В области терапевтической стоматологии** результаты, полученные в ходе проведения измерений методом ЛФД, в целом подтверждаются бактериологическим методом. При этом удовле-



**Рис.4. Флуоресценция а) аэробной (туберкулез) и б) анаэробной (сифилис) инфекции**

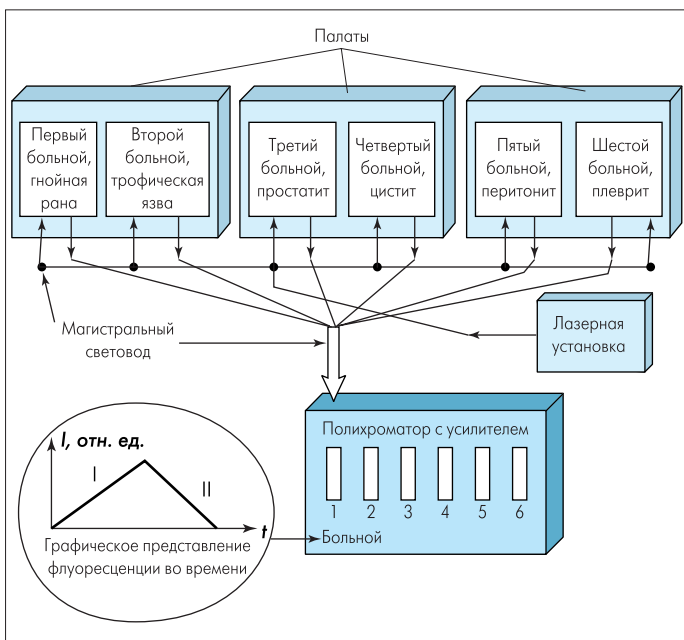


Рис.5. Блок-схема клинического комплекса ЛФД гнойной инфекции

творительная гигиена, выявленная флуоресцентным методом, всегда подтверждалась общепринятыми стоматологическими индексами. В то же время, диагностика флуоресцентным методом удовлетворительного и неудовлетворительного гигиенического состояния тканей и объектов полости рта в большинстве случаев не совпала с клиническими показателями и это подтвердило тот факт, что определение гигиенического состояния полости рта флуоресцентным методом, как более чувствительным, предпочтительнее.

Экспериментальные и клинические результаты флуоресцентной оценки твердых тканей зубов позволяют говорить о ряде положительных свойств ЛФД. Во-первых, метод обладает высокой чувствительностью, а лазерное излучение данной мощности не вызывает "возмущений" в исследуемом объекте. Во-вторых, он обеспечивает определение кариозных изменений на этапе молекулярных, а не цветовых изменений тканей зуба. Данный факт говорит, что ЛФД можно применять для диагностики кариозного процесса, определения тщательности обработки полости перед наложением пломбы непосредственно на рабочем месте, мониторинговой оценки качества пломбирования зубов.

Регистрация сигналов с помощью гибкого световода обеспечивает исследование любых, в том числе труднодоступных, участков зубных рядов и поверхности зуба у взрослых и детей. Высокая воспроизводимость результатов обследования (погрешность в пределах 2–5%) позволяет расценивать ЛФД как весьма объективный вид исследования твердых тканей зубов, кариеса, его осложнений (пульпит, периодонтит) и пародонтита, т.е. заболеваний, охватывающих свыше 90% населения РФ.

**В гнойной хирургии.** На основании экспериментальных исследований и клинических наблюдений отмечено, что *in vivo* увеличение концентрации микроорганизмов приводит к усилению мощности флуоресценции, а уменьшение – к снижению интегрального нормированного показателя флуоресценции, что и легло в основу клинического экспресс-метода оценки эффективности антимикробных препаратов. Разработанный методологический подход позволил предотвратить осложнения и сократить сроки лечения больных на 2–15 дней в зависимости от степени тяжести заболевания.

ЛФД проявила себя как многофункциональная клиническая методика, открывающая возможность проведения большого спектра

диагностических исследований – от определения наличия и степени тяжести патологических процессов в биотканях и организме больного в целом до проведения глубоких мониторинговых диагностических исследований местного и общего статуса больных с патологией микробной природы. Концепция ЛФД гнойно-воспалительных заболеваний дает возможность впервые в мировой практике предложить экспресс-метод диагностики, прогнозирования и оценки эффективности лечения больных с гнойно-воспалительными заболеваниями и другой патологии микробной природы. На рис.5 приведена блок-схема аппаратно-программного комплекса ЛФД гнойной инфекции, где на графике распределения флуоресценции в реальном времени рост ее интенсивности (I) свидетельствует об ухудшении патологического процесса и неадекватном лечении, а снижение (II) – о реабилитации и адекватном лечении.

В отличие от большинства существующих методов, у ЛФД широкий диапазон клинических применений, он не требует введения дополнительных медикаментов или препаратов, обеспечивает практически бесконтактный способ диагностики, не имеет противопоказаний, не вызывает аллергических реакций.

Возможность точной пространственной и временной дозировки и транспортировки энергии по световодам позволяет осуществлять ЛФД как экстр-, так и интракорпорально, инвазивно или неинвазивно с использованием традиционных эндоскопических, лапароскопических и видеосистем. Метод ЛФД может применяться совместно с традиционными методами диагностики и лечения широкого круга заболеваний.

Метрологическое сопровождение (калибровка, нормированные количественные показатели флуоресценции) терапевтических и хирургических вмешательств ЛФД-метода дает новые знания о механизмах болезни, особенностях ее течения, лечения и процесса реабилитации в целом.

### ПРИМЕНЕНИЕ ЛФД В ПИЩЕВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Пищевые продукты, такие как молоко, творог, сметана, сыр, пиво, вино, – все это результат жизнедеятельности бактерий (аэробных и анаэробных). Изменение качественного и количественного состава микрофлоры этих продуктов приводит к изменению их органолептических характеристик: цвета, запаха, консистенции, вкуса. Поэтому актуальность проблемы оценки качества продукта на всех этапах его изготовления, хранения, реализации и применения не вызывает сомнений. Эта проблема является общегосударственной и во многом определяет здоровье населения. Благодаря методу ЛФД появилась возможность экспресс-диагностики (за секунды, минуты) бактериальной обсемененности продуктов. Данная диагностика основана на знании основных спектрально-энергетических параметров бактерий, вызывающих порчу продуктов или нарушения технологии их изготовления и реализации.

Пример одного из предлагаемых применений метода ЛФД в пищевой промышленности – контроль производства сыра. Для этих целей в технологическую схему его изготовления включена волоконно-оптическая система ЛФД (рис.6), которая по изменению спектрально-амплитудных характеристик флуоресценции позволяет судить о нарушении технологии и, главное, определять, в каком звене технологической цепочки эти нарушения происходят. На основании полученных объективных данных своевременно (в экспресс-режиме) проводится коррекция биотехнологии. Кроме того, методика позволяет определять критические сроки объектов очистки технологической системы, что существенно удешевляет процесс изготовления продукции и сокращает простой оборудования.

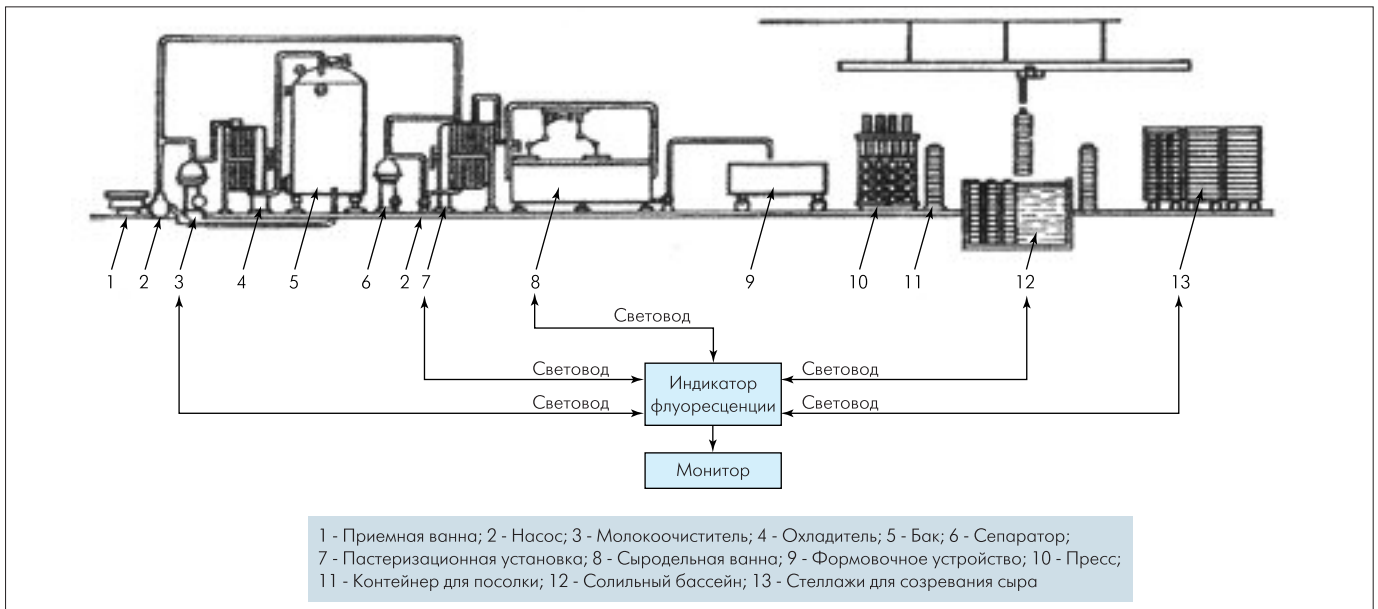


Рис.6. Схема производства сыра и места подведения световодов ЛФД

Предварительная апробация метода и аппаратуры ЛФД для оценки качества пищевых продуктов (молока, молочнокислых продуктов, сыра, вина, пива) подтвердила его эффективность на всех этапах их изучения, хранения, реализации и применения.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛФД В ЭКОЛОГИИ**

Как известно, в наш век глобальных природных и техногенных катастроф, различных проявлений терроризма, социально-бытовой и экономической неустроенности экологическая безопасность населения приобретает важное значение. В связи с этим развитие экспресс-технологий оценки безопасности окружающей среды (водных ресурсов, сельскохозяйственных угодий, промышленных и природоохранных объектов) приобретает чрезвычайную актуальность.

На основе методов и аппаратуры ЛФД возможно создание мониторинговых стационарно-лабораторных аналитических аппаратно-программных комплексов для контроля качества очистки питьевых и промышленных водоисточников на всех этапах очистки, включая оценку состояния сточных вод, водозаборных систем и отстойников, систем фильтрации, биологической и физико-химической антибактериальной обработки, систем доставки воды к потребителю (рис.7). Для полевых условий легко формируется мобильный вариант ЛФД-комплекса из переносной установки ЛФД и портативного компьютера.

Высокая чувствительность ЛФД-метода, возможность получения количественных результатов практически в реальном времени на

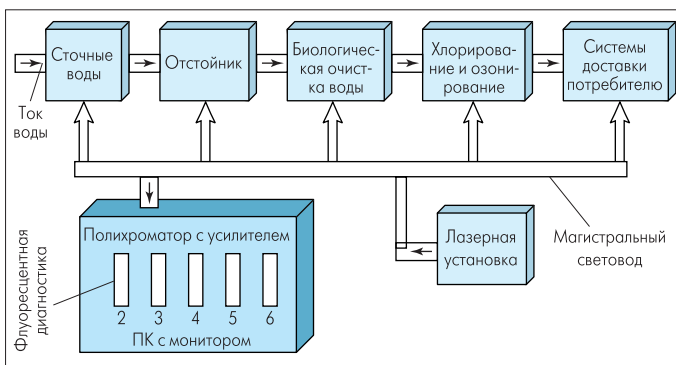


Рис.7. Блок-схема ЛФД-комплекса проверки очистки воды на водоочистительных станциях

принципе обратной связи позволяют своевременно проводить адекватные охранозащитные мероприятия. Создание и внедрение автоматизированных лазерных аппаратно-программных комплексов

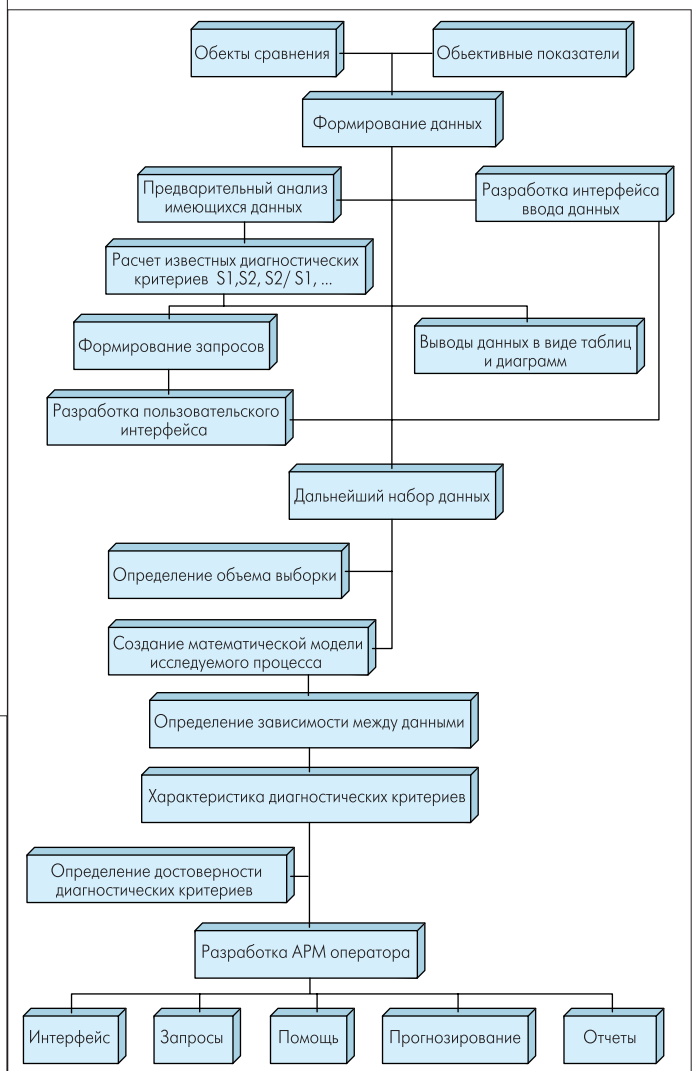


Рис.8. Блок-схема автоматизированного лазерного аппаратно-программного комплекса экологического мониторинга



сов (рис.8) для мониторинга окружающей среды на основе разрабатываемых баз данных для экологических объектов позволит повысить экологическую безопасность как отдельных регионов, так и государства в целом.

Принципы и средства лазерной флуоресцентной диагностики окружающей среды на основе экспресс-индикации ее бактериальной загрязненности могут использоваться и для токсикологической экспресс-оценки воздействия неблагоприятных внешних факторов на растительный и животный мир, включая среду обитания человека. В частности, авторы выявили, что флуоресценция хлорофиллсодержащих биологических объектов существенно зависит от экологического состояния среды их обитания. Регистрируя показатели флуоресценции с помощью представленных аппаратуры и диагностических алгоритмов, можно оценивать состояние окружающей среды, сроки созревания урожая зерновых и плодовоовощных культур, качество урожая и плодородие земельных и водных ресурсов. Предварительные поисковые исследования свидетельствуют о перспективности использования методов ЛФД.

*Авторы статьи выражают благодарность за помощь в проведении экспериментальных исследований и клинических наблюдений Лощену В.Б., Бажанову Н.Н., Имамудинову Н.И., Брагиной М.Н., Таубинскому И.М., Козьме С.Ю.*

#### ЛИТЕРАТУРА

**Александров М.Т., Бажанов Н.Н., Зайцева Е.В. и др.** Проблема диагностики анаэробной инфекции и дисбактериоза в клинической стоматологии. – Вестник Российской академии наук, 1999, №12.  
**G.W.Welling et al.** Monitoring of intestinal bacteria with FISH (fluorescence in situ hybridisation) using 16 S rRNA targeted oligonucleotide probe. – Abstr. 21 Intern. Congress Microb. Ecol. Dis., Paris, 28–30 October 1996.

**Александров М.Т., Бажанов Н.Н., Воробьев А.А., Пашков Е.П., Нестерова М.В.** Интегральный показатель состояния микрофлоры кишечника, выявленной с помощью флуоресценции. – Клиническая лабораторная диагностика, 1999, №11.

**Александров М.Т., Пашков Е.П., Нестерова М.В.** Метод флуоресцентной диагностики – метод индикации микрофлоры человека в норме и патологии. – ЖМЭИ, 2001, №3.

Пат. 2121289 РФ. Способ определения состояния биологической ткани/Александров М.Т., Черкасов А.С. и др. Приор. 14.01.97.

**Морозова О.А.** Экспериментальное обоснование экспресс-метода лазерной флуоресцентной диагностики заболеваний микробной природы. – Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. мед. наук. – М., 2002.

**Александров М.Т., Титова С.Н. и др.** Экспресс-метод оценки эффективности лечения гнойной раны на основе применения лазерной флуоресцентной фотометрии. – Стоматология для всех, 2002, №2.

**Матвеева А.И., Гветадзе Р.Ш., Дронов Д.А., Амирханян А.Н., Борисов А.Г., Балуда И.В.** Разработка клинических методов диагностики и профилактики в дентальной имплантологии. – Российский стоматологический журнал, 2000, №2.

**Alexandrov M.T., Taubinsky I.M., Kozma S.J., Romanov A.M.** Perspectives of studying of own fluorescence of dental solid tissues. – Proc. SPIE, vol. 3829.

**Александров М.Т., Таубинский И.М., Козьма С.Ю., Черный В.В.** Перспективы применения методов флуоресцентной спектроскопии для исследования твердых тканей зуба. – Биомедицинская радиоэлектроника, 1999, №8.

**Alexandrov M.T., Taubinsky I.M., Kozma S.J., Romanov A.M.** Laser-induced tissue fluorescence in patients with benign and premalignant changes of the uterine cervix. – Proc. SPIE, vol. 3829.



#### Необходимость в подготовке инженеров по контролю качества

Контроль полупроводниковых приборов, который когда-то рассматривался как необходимое зло, теперь становится жизненно необходимым – без него невозможно ни повышение гарантии качества прибора и конечной продукции, ни снижение ее стоимости. Рост значения контроля ИС очевиден: один ведущий изготовитель ИС подсчитал, что его перспективные приборы проверяются  $10^{15}$  раз! Это непостижимое число проверок связано с множеством этапов контроля на протяжении всего технологического процесса: в начале процесса (оценка проекта), на стадии изготовления первых приборов (доработка прибора), основного изготовления (проверка характеристик пластины и контроль приборов на пластине до корпусирования), затем – при корпусировании, когда сами корпуса подвергаются контролю для гарантии рабочих параметров приборов.

Развитие сложных ИС, таких как система-на-чипе (SOC), порождает другую важную проблему – смогут ли, например, SOC-тестеры справиться со сложностью несовместимых технологий этих ИС. Ведь известно, что SOC содержит множество таких составных частей, как ОЗУ, микропроцессоры, флэш, АЦП и ЦАП. Инженеры по контролю должны вычислить, как снизить стоимость контроля на функцию этих приборов и разработать новую и недорогую контрольно-измерительную аппаратуру. Чем полнее содержание чипа и чем критичнее его применение, тем важнее становится значение контроля.

Все это говорит о новых требованиях к специалистам по контролю. Растет необходимость в инженерах с глубокими

знаниями в различных областях – только они способны разрабатывать новые методологии контроля. В контрольно-испытательных компаниях США сегодня, как правило, работают инженеры широкого профиля – ранее они получили образование в области электротехники, механики или вычислительной техники, а затем приобрели опыт по контролю. Таким образом, обычно они приходят в промышленность, вначале не обладая междисциплинарными знаниями, особенно нужными для тестирования таких сложных приборов, как SOC.

Знание роли контроля в обеспечении коммерческого успеха конечной продукции должно формироваться на университетском уровне. Сегодня такой дисциплины, как техника контроля, не существует и отсутствует школа, где можно получить степень по инженерному контролю. Если университеты будут больше внимания уделять междисциплинарному подходу, это повысит интерес учащихся к контролю. Студент будет осведомлен о том, как взаимодействуют отдельные части процесса изготовления ИС и начнет искать пути оптимизации процедур контроля. При разработке программы обучения инженеров по контролю необходимо совместное участие академических и промышленных кругов. Важным аспектом программы должна стать связь проектирования с контролем, а именно учет контролепригодности готового изделия еще при проектировании.

**Снижение электромагнитных помех**

Такие необходимые элементы мобильных телефонов и других беспроводных устройств, как электромагнитные экраны, обычно выполняются на уровне печатной платы (ПП) в виде ряда металлических колпачков, размещаемых поверх компонентов и присоединяемых к ПП расплавлением припоя. Металлические колпачки не препятствуют контролю ПП до финальной сборки, но вызывают осложнения из-за необходимости снимать их, если требуется ремонт или замена. Другой вариант экрана – прокладки. Они упрощают ремонт, но накладывают другие ограничения: нельзя проводить контроль, пока прибор не будет полностью собран; для каждого типа прибора должны формироваться различные покрытия; процесс формования может быть дороже, чем изготовление колпачков.

Преодолеть проблемы, связанные с обоими типами экранирования, и в то же время повысить рабочие характеристики устройств обещает недавняя разработка термопластичного металлизированного экрана. Формованный из этого материала экран весит на 80–90% меньше, чем металлический колпачок тех же размеров. Благодаря тому, что металлизация выполнена снаружи и изолирующий пластический материал основы находится в контакте с ПП, может быть получен более низкий профиль. Снижается также минимальное расстояние между компонентами на 25–50%, освобождая полезное пространство на ПП.

Новому материалу можно придавать любую конфигурацию, он может включать множество полостей и быть приспособлен к компонентам любой формы и размеров. Благодаря таким достоинствам и сравнимой с колпачками стоимостью новая разработка, по-видимому, заменит металлические колпачки.

Запатентованный зажимной механизм позволяет размещать экран из нового материала на ПП после расплавления припоя, а не припаивать его непосредственно к ПП. При необходимости ремонта его легко можно снять и поставить на то же место новый экран.

Экран из термопластичного металлизированного материала показал при ускоренных испытаниях большую эффективность экранирования, чем металлические колпачки.

[www.e-insite](http://www.e-insite) (EP&P, 2003, 01.04)

**Самодиагностирование и самокалибровка контрольно-измерительной аппаратуры**

Многие контрольно-измерительные приборы оснащены средствами самодиагностирования и самокалибровки. Самодиагностирование обеспечивает проверку основной работы прибора. Это выявление неправильных установок параметров, контроль ЗУ, подтверждение работы внутреннего источника питания на требуемом уровне; в некоторых приборах – определение внутренней температуры и проверка портов коммуникации. Одни приборы проводят самодиагностирование каждый раз при включении, другие – только при нажатии кнопки.

Ряд приборов помимо самодиагностирования обладают средствами самокалибровки, которые проводят внутреннюю проверку и настройку с помощью внутренних эталонов. Цифровые мультиметры, например, могут содержать опорный источник напряжения, осциллографы часто снабжены калибратором сигнала, позволяющим проверять измерения напряжения и временных характеристик.

В таблице приведены контрольно-измерительные приборы, оснащенные средствами самодиагностирования и самокалибровки.

Фирма-изготовитель	Модель	Название прибора	Операция
Fluke	4950	Многофункциональный эталон сравнения	Проверка достоверности
Agilent	3458A	Цифровой мультиметр	Самоконтроль, автокалибровка
Agilent	54750A	Цифровой осциллограф	Самотестирование для основного блока и съемных модулей
Fluke	5700A	Многофункциональный калибратор	Самотестирование, диагностирование и калибровка
Agilent	8757D	Скалярно-векторный анализатор	Самодиагностирование
Fluke	PM6681	Таймер/счетчик/анализатор	Самотестирование
Tektronix	TDS7404	Осциллограф с цифровым люминофором	Самодиагностирование и калибровка

[www.e-insite.net/tmworld/](http://www.e-insite.net/tmworld/)