

Применение векторного анализатора цепей для измерений параметров СВЧ pin-диодов

Б. И. СЕЛЕЗНЕВ, Г. В. ГУДКОВ, А. В. ШТРО, А. В. ПЕТРОВ, А. С. ИОНОВ

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия, e-mail: Boris.Seleznev@novsu.ru

Рассмотрен метод прямых измерений сопротивлений потерь для СВЧ pin-диодов с применением векторного анализатора цепей. Проанализированы проблемы конструирования контактного устройства для измеряемых pin-диодов и калибровки. Приведена схема установки для одно- и двухпортовых измерений.

Ключевые слова: pin-диод, сопротивление потерь, векторный анализатор цепей, параметры матрицы рассеяния, диаграмма Вольперта—Смита, контактное устройство, компланарный волновод, калибровочная мера.

The method of direct measurements of loss resistance for microwave pin-diodes with application of path vector analyzer is considered. The problems of design of a contact device for measured pin-diodes and calibration are analyzed. The scheme of installation for one-port and two-port measurements is presented.

Key words: pin-diode, loss resistance, path vector analyzer, matrix scattering parameters, Wolpert-Smith chart, contact device, coplanar waveguide, calibration measure.

Из-за ряда свойств и простоты конструкции pin-диоды на протяжении полувека широко используют в ВЧ- и СВЧ-диапазонах для управления уровнем СВЧ-сигналов, коммутации ВЧ- и СВЧ-мощности в линиях передач, защиты входных цепей радиотехнических устройств [1]. Применение СВЧ pin-диодов в аппаратуре специального назначения предъявляет к ним особые требования. Одним из них является контроль электрических параметров каждого прибора в выпускаемой партии. Наибольшую сложность представляют измерения прямого и обратного сопротивлений потерь. Традиционный метод таких измерений основан на определении посредством измерительной линии параметров стоячей волны, возникающей при отражении созданной генератором СВЧ-мощности падающей волны от измеряемого диода, включенного в качестве нагрузки [2]. Данный метод обладает очень низкой производительностью. Сначала необходимо определить показание индикатора измерительной линии, соответствующее ближайшему к плоскости отсчета минимуму, затем разность показаний в точках слева и справа от минимума, в которых напряженность электрического поля вдвое превышает минимальную. Потом выполнить расчет сопротивления потерь. При контроле партий изделий в условиях производства как альтернативу традиционному методу используют векторный анализатор цепей, обеспечивающий более высокую производительность измерений прямого и обратного сопротивления потерь pin-диода.

Структура pin-диода изображена на рис. 1. В нее входят две сильнолегированные области проводимостью p - и n -типа (анод 6 и катод 1), между которыми находится i -область 2, отличающаяся высокими удельным сопротивлением и временем жизни носителей заряда. При прямом смещении происходит двойная инжекция носителей заряда (электронов из n^+ - и дырок из p^+ -области) в i -область, и ее сопротивление резко уменьшается. Для высоких частот эквивалентная схема pin-диода представляет последовательное соединение резистора R_S и паразитной индуктивности контактов

L (рис. 2, а). Сопротивление резистора определяется выражением [3]:

$$R_S = w^2 / [(\mu_n + \mu_p) I_f \tau], \quad (1)$$

где w — толщина i -области; I_f — ток прямого смещения; μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок в i -области; τ — время жизни неосновных носителей заряда i -области.

Таким образом, сопротивление резистора R_S обратно пропорционально току прямого смещения и в рабочем режиме обычно составляет около 1 Ом. По справочным данным изготовителя прямое сопротивление потерь pin-диодов, для которых разработаны измерительная установка и методика измерений параметров, не должно превышать 1,5 Ом на частоте 0,5 ГГц при токе прямого смещения 10 мА. Равенство (1) справедливо для высоких и сверхвысоких частот, когда период колебаний становится меньше времени пролета носителей заряда через i -область. Нижняя частота, удовлетворяющая этому условию, может быть определена из выражения

$$f_\tau = 1300/w^2. \quad (2)$$

При обратном смещении сопротивление i -области остается высоким (единицы — десятки кОм), и эквивалентная схема представляет параллельное соединение этого сопротивления и емкости структуры; последовательно с ними включена паразитная индуктивность контактов (см. рис. 2, б). На частотах, превышающих частоту диэлектрической релаксации i -области и определяемую выражением

$$f_\tau = 1/(2\pi\epsilon_0\epsilon\rho), \quad (3)$$

где ρ — удельное сопротивление i -области; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, емкость pin-диода (в отличие от диода с pn -переходом) практически не зависит от обратного напряжения и может иметь вид

$$C = \epsilon_0 \epsilon A / w, \quad (4)$$

где A — наименьшая площадь одного из переходов.

Для рассматриваемого рpn-диода справочное значение емкости составляет 0,35 пФ на частотах более 1 МГц при обратном напряжении 1 В.

Сопротивление при прямом и обратном смещении оказывает влияние на характеристики устройств, выполненных на рpn-диодах. В качестве параметров принято использовать прямое и обратное сопротивления потерь, под которыми понимается активная составляющая полного входного сопротивления рpn-диода соответственно при прямом и обратном смещении. Обратное сопротивление потерь измеряется в пересчете на последовательную схему и в этом случае обычно составляет несколько Ом.

В условиях серийного производства возникает необходимость разработать аппаратную часть и методику измерений прямого и обратного сопротивлений потерь рpn-диодов в режиме: частота 1 ГГц, уровень СВЧ-мощности 10 дБ, ток прямого смещения 1—10 мА, напряжение обратного смещения 3—20 В. Обязательное условие — обеспечение высокой производительности, поскольку предусматривается 100 %-ый контроль изделий. Его можно обеспечить, применив *векторный анализатор цепей*. В настоящее время они широко распространены в нашей стране. Наряду с изделиями ведущих мировых производителей, таких как Agilent Technologies, используются приборы ООО «Планар».

В данной статье представлена разработанная измерительная установка, в которой используется измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (ИККПО) «Обзор-304/1». Это модификация прибора «Обзор-304», не имеющая встроенного компьютера, дисплея и клавиатуры на передней панели и предназначенная для работы с внешним компьютером, не входящим в комплект поставки. Прибор измеряет параметры матрицы рассеяния, а результаты выдает в различных форматах. Для работы наибольший интерес представляет полное входное сопротивление измеряемого рpn-диода, которое можно изобразить в виде суммы реальной и мнимой частей, т. е. $R + jX$. Полное входное сопротивление рассчитывают по измеренным S -параметрам. Различные типы СВЧ-устройств можно описать при помощи падающих и отраженных волн, которые распространяются в подключенных к ним линиях передач. Связь между этими волнами изображается волновой матрицей рассеяния или матрицей S -параметров [4].

Комплексные числа обычно отображают на комплексной плоскости, но следует иметь в виду, что открытая цепь (холостой ход) имеет бесконечное значение реальной части, которое невозможно показать на соответствующей оси. Поэтому вместо прямоугольной системы координат используют диаграмму Вольперта—Смита, на которой все значения реактивного и активного (от 0 до ∞) сопротивлений находятся внутри наружного круга диаграммы. Постоянные значения активного сопротивления изображаются как окружности, реактивного — как дуги. Центр диаграммы соответствует идеальному согласованию, т. е. активному сопротивлению 50 Ом.

Структурная схема измерительной установки представлена на рис. 3. Сечение коаксиального тракта выбирали из условия, что большинство устройств имеют разъемы типа SMA. В установке используют тройники ввода смещения 5 и измерительные кабели 6 производства компании

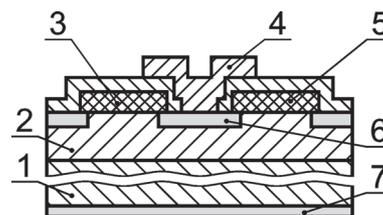


Рис. 1. Структура рpn-диода:

1 — низкоомная подложка n -типа (катод); 2 — высокоомный эпитаксиальный слой (i -область); 3 — пленка SiO_2 , полученная окислением в хлорсодержащей среде; 4 — омический контакт к аноду (Al); 5 — пленка SiO_2 , полученная осаждением в вакууме; 6 — область p -типа (анод); 7 — омический контакт к катоду (сплав AuGeSb)

Mini-Circuits. Также был разработан блок источников постоянного смещения 7 и контактное устройство 10. Блок 7 состоит из регулируемых источников тока и напряжения со встроенными панельными миллиамперметром и вольтметром. Выходной ток источника напряжения ограничен на уровне 20 мА во избежание пережигания металлизации платы контактного устройства при случайном коротком замыкании. Управление подачей прямого тока и обратного напряжения смещения осуществляется дистанционно при помощи тумблера, расположенного на корпусе контактного устройства.

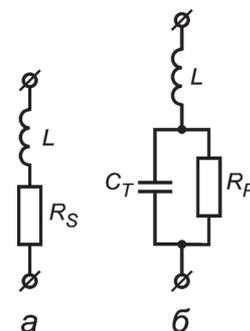


Рис. 2. Эквивалентная схема рpn-диода при прямом а и обратном б смещении

Основные проблемы возникают при разработке контактного устройства для измеряемого рpn-диода, которое в [2] именуется «диодной камерой». В англоязычной литературе обычно используется термин «fixture», что в переводе может означать «зажимное приспособление». Разработкой и изготовлением таких устройств занимается компания Inter-Continental Microwave. Сведений о том, поставляется ли ее продукция в Россию, нет. Поэтому предполагаем, что каждый отечественный производитель решает эту проблему самостоятельно. Очевидно, что конструкция контактного устройства определяется типом корпуса рpn-диода. В данной работе — это КТ46, аналог широко известного SOT23, имеющий планарные выводы. Самым простым решением является установка измеряемого рpn-диода на печатную плату в перевернутом состоянии. Для надежной фиксации в плате вырезается отверстие по размеру корпуса, тогда выводы находятся в соприкосновении с токоведущими элементами платы. Надежный контакт обеспечивает прижимное устройство. Его конструкция может быть любой, но необходимо учитывать, что результаты зависят от контактного сопротивления, т. е. прижимное усилие не должно меняться от измерения к измерению. Это особенно важно, если усилие прикладывается не к выводам в месте их контакта с платой, а к корпусу, так как в этом случае может возникнуть деформация выводов и их перемещение по плате. Размещение же корпуса в прорези на плате позволяет упростить конструкцию прижимного устройства, которое также не должно иметь металлических частей, расположенных близко к измеряемому рpn-диоду [5]. Учитывая все факты, прижим осуществ-

ляли подпружиненным диэлектрическим стержнем с резиновым наконечником, воздействующим на все выводы.

Особое внимание уделено обеспечению качественных характеристик СВЧ-тракта от измерительного кабеля до измеряемого рpн-диода. Главная цель — поддержание постоянного волнового сопротивления 50 Ом при переходе от одного типа линии передачи к другому. Для перехода от коаксиального тракта к компланарному волноводу использовали разъем SMA-типа Amphenol 901—9850, установленный непосредственно на печатную плату. Выбор между микрополосковой линией и компланарным волноводом был решен в пользу последнего, благодаря его геометрическим размерам, идеально подходящим для размещения рpн-диода. Микрополосковая линия сопротивлением 50 Ом имеет достаточно большую ширину, что усложняет ее использование при небольших размерах корпусов и выводов. Геометрия компланарного волновода, в основном, определяется относительной диэлектрической проницаемостью ϵ материала платы. Поэтому был выбран фольгированный ФЛАН-10 с $\epsilon = 10$.

Прибор «Обзор-304» позволяет проводить одно- и двухпортовые измерения. В первом случае каждый порт выступает как источник падающего сигнала и как приемник отраженного сигнала. При этом измеряются параметры матрицы рассеяния S_{11} или S_{22} . Во втором случае поочередно один из портов является источником падающего и приемником отраженного сигнала, в то время как другой выполняет функцию приемника выходного сигнала. Когда роль источника исполняет первый порт, измеряются параметры S_{11} , S_{21} , когда второй — S_{22} , S_{12} . Для расчета полного сопротивления

можно использовать любой из этих параметров, однако оптимальный выбор определяется значением этого сопротивления и схемой включения рpн-диода в измерительную цепь.

Рассмотрим вначале *однопортовые измерения*, когда измеряется коэффициент отражения S_{11} (или S_{22} , если используется порт 2), значение которого связано с полным входным сопротивлением Z_x выражением

$$S_{11} = (Z_x - Z_0) / (Z_x + Z_0), \quad (5)$$

где $Z_0 = 50$ Ом — волновое сопротивление измерительного тракта.

Из (5) следует: если сопротивление Z_x значительно отличается от 50 Ом, то коэффициент отражения близок к единице, а его изменение настолько мало, что с трудом выделяется на фоне трассового шума, определяемого как изменение трассы высокого уровня сигнала из-за шума. На практике нижняя граница диапазона измерений составляет 1 Ом — это ограничивает использование однопортовых измерений прямого и обратного сопротивлений потерь.

Двухпортовые измерения обеспечивают высокую точность в очень широком диапазоне. При этом может быть использовано последовательное или параллельное включение измеряемого рpн-диода. В первом случае он вставляется в разрыв центральной полоски компланарного волновода; во втором — структура волновода не нарушается, вывод анода рpн-диода находится в контакте с центральной полоской, вывод катода — с одной из боковых (заземленных) полос. Для таких измерений необходимо более сложное контактное устройство, так как прорезь исключается, а рpн-диод устанавливается на плату в естественном положении. Теперь для его фиксации на плате применяют фторопластовую пластину толщиной 1 мм, в которой делается отверстие по форме корпуса и выводов. Использование пластины приводит к необходимости нового расчета геометрических размеров волновода. Сложность вызывает и доработка прижимного устройства так, чтобы прижимное усилие прикладывалось в месте контакта каждого вывода с элементами волновода. В крайнем случае, можно осуществить нажим и на корпус, но при этом тяжело одновременно обеспечить отсутствие смещения выводов и качественный контакт.

При двухпортовых измерениях для расчета полного сопротивления может быть использован либо параметр S_{11} , либо S_{21} . Однако S_{11} больше ограничен уровнем собственных шумов векторного анализатора цепей и некоторыми другими факторами [6], поэтому предпочтительнее использовать параметр S_{21} . В этом случае для полного сопротивления менее 50 Ом, что имеет место для рpн-диодов, больше подходит параллельное включение. Если же используется параметр S_{11} , то лучший результат дает последовательное включение. Отметим, что параллельное включение в данной работе не рассматривалось, так как усложняется вопрос реализации калибровочной меры «холостой ход», поскольку линия передачи не имеет разрывов.

Подготовка к измерениям. Ключевым моментом при подготовке к измерениям является калибровка. Процесс ее проведения и необходимые теоретические сведения подробно рассмотрены в руководстве по эксплуатации ИККПО «Обзор-304». Отметим, что данный анализатор поддерживает пять методов калибровки, при этом наивысшую точность из них обеспечивает полная двухпортовая. Однако существует

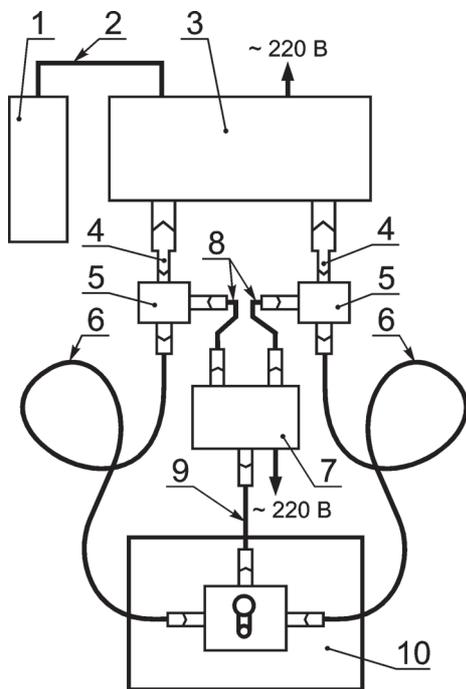


Рис. 3. Схема установки для измерений параметров рpн-диодов: 1 — персональный компьютер; 2 — кабель USB; 3 — ИККПО «Обзор 304/1»; 4 — адаптер N/SMA; 5 — тройник ввода смещения; 6, 8, 9 — кабели измерительный, подачи и управления смещением, соответственно; 7 — блок источников постоянного смещения; 10 — контактное устройство

одна особенность: для калибровки используют стандартные наборы калибровочных мер с известными характеристиками. Все калибровочные меры имеют коаксиальный разъем для подключения к измерительному кабелю. Таким образом, плоскость калибровки будет проходить через выходной разъем кабеля. Если тестируемое устройство имеет коаксиальный вход, то калибровка легко осуществима, но в проводимой работе плоскость калибровки должна проходить в месте контакта вывода измеряемого рpn-диода с центральной полоской компланарного волновода.

При измерениях с использованием контактного устройства могут быть использованы два типа калибровки: Thru-Reflect-Line (TRL) и Short-Open-Load-Thru (SOLT) [5, 7], при которых пользователь сам изготавливает наборы калибровочных мер и описывает их. Современные векторные анализаторы цепей, в том числе и «Обзор-304», дают такую возможность. Из-за относительной простоты изготовления калибровочных мер выбрана SOLT-калибровка. При однопортовых измерениях задача упрощается, так как полная однопортовая калибровка требует подключения трех калибровочных мер — «короткое замыкание» (short), «холостой ход» (open) и «нагрузка» (load). При двухпортовых измерениях, когда проводится полная двухпортовая калибровка, к ним добавляется еще одна — «перемычка» (thru). Общее требование ко всем калибровочным мерам — их геометрические размеры должны быть такими, чтобы электрический контакт с элементами компланарного волновода осуществлялся точно в тех же местах, что и у выводов измеряемого рpn-диода.

Наиболее просто реализуется калибровочная мера «короткое замыкание». В идеале она должна обеспечивать полное отражение с фазовым сдвигом 180° . В качестве этой меры может выступать, например, плоская металлическая пластинка, причем в случае компланарного волновода она должна замыкать центральную полоску с обеими боковыми. Для уменьшения индуктивности длина пластинки берется минимальной.

Калибровочная мера «холостой ход» по сути представляет собой окончание линии передачи в месте контакта с выводом тестируемого прибора, т. е. «пустое» контактное устройство. Она обеспечивает полное отражение без фазового сдвига. В реальности фазовый сдвиг имеет место из-за краевой емкости, определение которой достаточно сложно и подробно рассмотрено в [5, 7]. В дальнейшем краевая емкость вносится пользователем в описание меры.

Идеальная калибровочная мера «нагрузка» не должна отражать падающий сигнал во всем используемом частотном диапазоне. На самом деле, особенно если используются не коаксиальные меры, отражение всегда имеет место на некоторых частотах. Неплохие результаты получаются, если в качестве «нагрузки» используют стандартные резисторы для поверхностного монтажа (SMD), обладающие малой индуктивностью. Эти резисторы необходимо подобрать по размеру корпуса и минимальному допуску, причем рекомендуется использовать не один резистор сопротивлением 50 Ом, а два по 100 Ом, соединенных параллельно, что значительно улучшает согласование [5, 7].

Калибровочная мера «перемычка» представляет обычную линию передачи, соединяющую контактные площадки платы, предназначенные для подключения измеряемого рpn-диода. Ее волновое сопротивление должно быть постоянным по всей длине и равно волновому сопротивлению

системы, т. е. 50 Ом. Также необходимо обеспечить точное совпадение и хороший контакт «перемычки» с контактными площадками; в данной работе — это участки центральной полоски компланарного волновода, контактирующие с выводами анода и катода.

После изготовления комплекта калибровочных мер создают его описание. В модуле памяти «Обзора-304» содержится информация на одиннадцать комплектов, пять из которых — predetermined, а остальные — это пустые шаблоны для ввода параметров пользовательских комплектов мер. Как отмечалось выше, для меры «холостой ход» указывается краевая емкость, а для меры «короткое замыкание» — паразитная индуктивность. Модели краевой емкости и паразитной индуктивности описываются в общем случае функцией частоты, в виде полиномов 3-го порядка. В работе не учитывали частотную зависимость, так как измерения проводили только на одной частоте. Для меры «перемычка» указывают значение электрической длины, т. е. задержку сигнала в одном направлении offset delay. Методика определения этого параметра приводится в [5]. Потери передачи offset loss принимали по умолчанию равными нулю.

В настоящее время измерительная установка находится в опытной эксплуатации на производстве, доступны только однопортовые измерения, и разрабатывается контактное устройство для двухпортовых измерений.

Выводы. Использование векторного анализатора цепей для измерений прямого и обратного сопротивлений потерь рpn-диода обеспечивает более высокую производительность, чем традиционный способ. Однопортовые измерения сопротивления потерь сравнительно просты в реализации, в то время как двухпортовые измерения, обеспечивающие более высокую точность, требуют более сложного контактного устройства и большего числа калибровочных мер.

Разработанное контактное устройство позволило хорошо согласовать геометрические размеры выводов рpn-диода и линии передачи. Его особенностью является то, что в качестве линии передачи использован компланарный волновод, изготовленный из фольгированного диэлектрика ФЛАН-10 с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости. Изготовленные авторами статьи калибровочные меры обеспечили выполнение SOLT-калибровки.

Результаты однопортовых измерений обратного сопротивления потерь очень сильно зависят от качества выполнения калибровки, поэтому их можно рекомендовать для измерения прямого сопротивления потерь, а двухпортовые следует использовать для определения обратного сопротивления потерь.

Л и т е р а т у р а

1. Резников В. А., Губырин Л. В. Высокочастотные и СВЧ рpn-диоды // Компоненты и технологии. 2000. № 4. С. 42—43.
2. ГОСТ 19656.10—88. Диоды полупроводниковые сверхвысокочастотные переключательные и ограничительные. Методы измерения сопротивлений потерь.
3. Microsemi Corporation [Электрон. ресурс]. http://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/14620-pin-diode-fundamentals (дата обращения 17.04.2013 г.).

4. **Рясный Ю. В., Чашков М. С., Борисов А. В.** Анализ методов измерений S-параметров транзисторов СВЧ // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 61—63; **Ryasnyi Yu. V., Chashkov M. S., Borisov A. V.** Analysis of a method of measuring the S-parameters of microwave transistors // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 10. P. 1209—1213.

5. **Designing and Calibrating RF Fixtures for Surface-Mount Devices** [Электрон. ресурс]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-3247EN.pdf> (дата обращения 10.05.2012 г.).

6. **Impedance Measurements. Evaluating EMC Components with DC Bias Superimposed** [Электрон. ресурс]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9887EN.pdf> (дата обращения 10.05.2012 г.).

7. **In-Fixture Measurements Using Vector Network Analyzers. Application Note Agilent AN 1287-9** [Электрон. ресурс]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5329E.pdf> (дата обращения 10.05.2012 г.).

Дата принятия 22.08.2013 г.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

616-074

Метрологическое обеспечение биохимических автоматических анализаторов

Н. П. МУРАВСКАЯ, Н. Ю. ГРЯЗКИХ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: griazskih@vniiofi.ru

Рассмотрены проблемы метрологического обеспечения биохимических анализаторов, предназначенных для измерений оптической плотности жидкой биологической пробы и последующего пересчета полученного значения в необходимый параметр. Исследованы возможности использования растворов нигрозина для проверки метрологических характеристик биохимических анализаторов. Предложено применение разработанного комплекта мер оптической плотности в качестве средств поверки биохимических анализаторов.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, биохимические анализаторы, меры оптической плотности.

The problems of metrological assurance of automatic biochemical analyzers for measurement of optical density of the liquid biological sample and subsequent conversion of the obtained value to required parameter are considered. The possibilities of using the Nigrosine solutions for verification of the metrological characteristics of biochemical analyzers have been studied. The application of the designed optical density measures as the means of the above measuring instruments verification is suggested.

Key words: metrological assurance, biochemical analyzers, measures of optical density.

Согласно [1] сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется и на измерения в области здравоохранения. Обязательные требования по проведению измерений устанавливают в целях обеспечения потребностей граждан, общества и государства в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов, используемых для защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической.

Клиническая лабораторная диагностика входит в область здравоохранения и является составной частью медицинской диагностики, включающей совокупность исследований *in vitro* биоматериала человеческого организма, основанных на гематологических, общеклинических, паразитарных, биохимических, иммунологических, серологических, молекуляр-

но-биологических, бактериологических, генетических, цитологических, токсикологических, вирусологических методах. Результаты этих исследований сопоставляют с клиническими данными и формулируют лабораторное заключение. Основная задача и условие развития лабораторной диагностики — получение объективных данных о состоянии здоровья отдельно взятого пациента из выделенной группы или населения региона в целом. Получение достоверной информации может быть реализовано на основе современных лабораторных технологий [2, 3].

Одной из областей клинической лабораторной диагностики является клиническая биохимия, использующая методы аналитической химии для исследования биологических объектов. Диагностику заболеваний или патологических состояний организма проводят путем количественного и ка-