УДК 621.315.592

В.Н. Давыдов, Д.А. Новиков

Измерительные методики и автоматизированный комплекс для исследования приборов опто- и наноэлектроники

Определен набор взаимно дополняющих характеристик, а также выбраны реализующие их измерительные методики, используемые для исследования электрических свойств полупроводниковых приборов и структур. Выбор методик основан на достижении широкого частотного и динамического диапазонов, высокой точности измерений, а также технической простоты реализации методики и возможности ее автоматизации. Приведено описание конструкции и измерительных возможностей разработанного автоматизированного комплекса. Экспериментальные исследования емкостных свойств гетероструктур из InGaN/GaN и шумового напряжения фоторезистора из CdSe подтвердили широкие метрологические возможности и высокую точность измерения параметров полупроводникового прибора.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс, метод емкостного делителя, мостовой метод, метод проходного конденсатора, амплитудно-фазовый метод, вольт-фарадная характеристики, фотопроводимость, шумовое напряжение.

В настоящее время для исследования свойств полупроводниковых структур, содержащих один или несколько *p–n*-переходов, а также структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) разработано большое количество методик и устройств, их реализующих. Многие из этих устройств, имея вывод данных на персональный компьютер (PC), тем не менее не позволяют управлять процессом измерения, что приводит к большим временным затратам и повышает трудоемкость. Устройства, имеющие двухстороннее сопряжение с PC, позволяют это сделать, но, как правило, обладают ограниченными метрологическими возможностями при высокой стоимости. Эти обстоятельства вынуждают исследователей самим разрабатывать новые методики и средства измерения параметров полупроводниковых приборов структур с использованием средств автоматизации (см., например, [1–6]). Часто в качестве основы измерительного комплекса используется система LabView [7] или другие стандарты западных производителей измерительной аппаратуры: 4200-SCS фирмы Keithley и др. Однако для них, как правило, характерны следующие недостатки: невозможность адаптации сценария эксперимента под исследуемый объект, отсутствие аппаратного и программного сопровождения, невозможность ремонта, плохая совместимость с измерительными установками отечественного производства, высокая стоимость.

Целью данной работы является обзор современных методов измерения параметров полупроводниковых приборов, а также разработка на их основе автоматизированного комплекса (АК), в котором должны сочетаться предельные метрологические возможности с широким диапазоном измеряемых характеристик и параметров, высокая точность и низкая себестоимость, а также возможность обработки и отображения результатов измерений современными программными средствами.

Выбор характеристик для исследования. При исследовании электрических свойств полупроводниковых приборов и гетероструктур важным является вопрос определения оптимального набора их характеристик, сочетание которых позволило бы получить максимальное количество взаимодополняющей информации об электронных процессах, происходящих в исследуемом объекте. Среди возможных характеристик выделим наиболее доступные и используемые, определив их в следующей классификации:

– электрофизические (вольт-амперные характеристики – ВАХ, вольт-фарадные характеристики – ВФХ, вольт-сименсные характеристики – ВСХ, измеряемые при различных частотах тестового сигнала и различных напряжениях смещения);

– фотоэлектрические (зависимости фотоЭДС или фотопроводимости от напряжения смещения и частоты модуляции светового потока);

– шумовые (зависимости дисперсии шумового процесса от напряжения на полупроводниковом приборе, частоты измерения шума, температуры прибора).

В этой связи необходимо помнить, что различные электрические характеристики объекта несут различную информацию о свойствах объекта.

Исследование ВАХ полупроводникового прибора позволяет количественно оценить качество прибора, например, по обратному току *p–n*-перехода или по «параметру качества» – *n* [8]. Измерение высокочастотной ВФХ дает информацию об уровне легирования прибора и величине энергетического барьера, плотности поверхностных состояний в поверхностно-барьерных структурах [4]. Однако ввиду высокой частоты измерения в этих измерениях нет информации о медленной перезарядке дефектных состояний полупроводника, структурной перестройке примесно-дефектных состояний и других процессах, ответственных за шокли-ридовскую генерацию и рекомбинацию носителей заряда. Эта информация в полной мере содержится в фотоэлектрических характеристиках полупроводниковых приборов, которые в силу большого числа нетрадиционных процессов перестройки и перезарядки примесно-дефектных состояний недоступны к наблюдению электрофизическими методами, весьма сложны в интерпретации. Шумовые измерения часто дают информацию, недоступную для других методов исследования, поскольку чувствительны к малым флуктуациям числа носителей заряда и изменениям зарядового состояния примесно-дефектных комплексов [9–11]. Это позволяет обнаруживать процесс образования метастабильных состояний, их развитие и последующий распад при действии допороговых внешних воздействий: фоновая засветка видимым излучениея, воздействие импульсного электрического и магнитного поля [10], слабые упругие напряжений. Приведенное выше описание возможностей различных измерительных методик позволяет выбрать в качестве базовых методик, необходимых для исследования полупроводниковых приборов и структур, следующие: метод ВАХ, метод высокочастотной ВФХ, измерение фотоэлектрических и шумовых свойств прибора. Перечисленные методики могут комбинироваться между собой, а также дополняться внешними воздействиями, повышающими их информативность [4].

За последние годы среди перечисленных параметров для исследования полупроводниковых приборов в части методики и ее схемотехнических решений наиболее серьезные изменения произошли в измерении емкостных и резистивных свойств, тогда как другие изменились несущественно [2, 4]. По этой причине рассмотрим методы измерения емкости.

Методы измерения полупроводниковой емкости. Проанализируем наиболее используемые методики измерения полупроводниковой емкости с позиции построения измерителя, обладающего широким диапазоном измеряемых емкостей (более трех порядков), который оценивается по функции преобразования тестового сигнала измерительной цепью, и точностью измерения, оцениваемой по производной функции преобразования тестового сигнала (1% и менее), а также возможности автоматизации процесса измерения. Будем считать, что емкость не имеет омических потерь.

Метод емкостного делителя. Одним из технически простых методов измерения эквивалентной емкости полупроводникового прибора является метод, основанный на измерении падения тестового напряжения малой амплитуды U_x на измеряемой емкости C_x, включенной последовательно с эталонной емкостью известной величины $C_{\text{эт}}$. Образовавшийся емкостный делитель запитан от источника тестового напряжения величиной $U_{\text{т}}$ ($|U_{\text{т}}| < kT/q$) и частотой ω (см. рис. 1, *а*) [4]. В этом случае падение напряжения на измеряемой емкости будет равно

$$U_x = U_{\text{т}}\left(\frac{C_{\text{эт}}}{C_{\text{эт}} + C_x}\right) = U_{\text{т}}\left(\frac{1}{1 + C_x/C_{\text{эт}}}\right). \quad (1)$$

Выражение (1) показывает, что зависимость $y = (U_x/U_{\text{т}})$ от переменной $x = (C_x/C_{\text{эт}})$ имеет ограниченный диапазон изменения: $0 < y < 1$. Точность измерения емкости этим методом определяется производной функции $y = y(x)$:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{(1+x)^2}.$$

Она не имеет экстремума в области конечных значений x и принимает максимальное значение при малых значениях аргумента, что указывает на максимальную точность метода при $C_x << C_{\text{эт}}$. Полагая точность измерения напряжения равной 3% – типичное значение аппаратной точности измерения параметров, найдем диапазон возможного изменения функции: $0{,}03 < y < 0{,}97$. Из этого

следует, что область значений аргумента, в пределах которой функция изменяется в указанном диапазоне, составит $0{,}03 < x < 30$. Это соответствует значениям измеряемой емкости в пределах трех порядков относительно эталонной емкости: на два порядка ниже и на порядок выше эталона.

Таким образом, метод емкостного делителя позволяет с удовлетворительной точностью измерить емкость двухполюсника, отличающуюся от эталонной емкости не более, чем на три порядка. При этом эталонная емкость емкостного делителя находится внутри указанного диапазона. Заметим, что в данном методе выходное напряжение измерительной цепи зависит от величины измеряемой емкости по нелинейному закону, что является нежелательным, т.к. в практической реализации обычно сводится к необходимости построения градуировочных кривых.

Данный вывод хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями [4], где при $C_{\text{эт}} = 100$ пФ диапазон корректного измерения емкости составлял от 3 до 1000 пФ. Вариации данного метода, например применением вычитания сигналов, на диапазон и точность измерения емкости существенного влияния не оказывают.

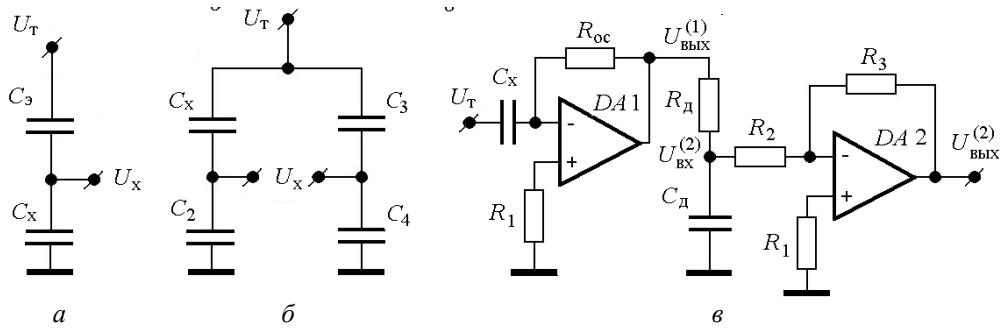

Рис. 1. Методы измерения полупроводниковой емкости методом емкостного делителя – *а*; мостовым методом – *б*; методом проходного конденсатора – *в*

Мостовой метод измерения. Мостовые методы широко используются в измерительной технике особенно в модификации балансного устройства (RCL -измерители марки «Agilent»). Этот метод может быть применен для измерения полупроводниковой емкости C_x, если составить мост из калиброванных емкостей (см. рис. 1, *б*) и сбалансировать его на емкости C_x^0 из диапазона измеряемых емкостей: $C_x^0 = C_3\left(\frac{C_2}{C_4}\right)$. При измерении неизвестной емкости C_x напряжение в диагонали моста будет

$$U_x = U_т\left(\frac{1}{1+C_2/C_4}\right)\cdot\left(\frac{C_x/C_3 - C_2/C_4}{C_x/C_3+1}\right).$$

Обозначив через $y = U_x/U_т$; $a = C_2/C_4$, $x = C_x/C_3$, выражение для функции преобразования неизвестной емкости в напряжение с помощью мота перепишется в виде

$$y(x) = \left(\frac{1}{1+a}\right)\cdot\left(\frac{x-a}{x+1}\right). \qquad (2)$$

Из выражения (2) следует, что минимальное значение напряжение в диагонали моста достигает при $x = 0$ и составляет $y(0) = -a/(1+a)$, а максимальное значение равно $y(\infty) = 1/(1+a)$. Другими словами, это означает, что максимальный диапазон изменения напряжения в диагонали моста равен напряжению тестового сигнала $U_т$. Как и в предыдущем методе, функция преобразования емкости в напряжения $y(x)$ не имеет экстремумов при всех возможных значениях аргумента, поскольку ее производная

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1+a}{(1+x)^2}$$

быстро убывает с ростом аргумента *x*. Максимальное ее значение достигается при малых значениях измеряемых емкостей. Оценим диапазон возможных значений измеряемой емкости при точности

измерения напряжения U_x на краях диапазона в 3%. Для этого найдем значения аргумента функции (2) x_1 по уровню $0{,}97/(1+a)$ и x_2 по уровню $-0{,}97a/(1+a)$. Тогда получим, что $x_1 \approx 30(1+a)$, $x_2 \approx 0{,}03a/(1+a) \approx 0{,}03 \approx 0$. Это значит, что при $a \ll 1$ диапазон измеряемых мостовым методом емкостей совпадет с таковым при измерении емкостным делителем. Если же выбрать $a \gg 1$, то можно расширить диапазон измеряемых емкостей в сторону больших значений емкости в соответствующее число раз. Так, выбрав $C_2 = 100 \cdot C_4$, диапазон измеряемых емкостей будет $0 < x < 30a = 3 \cdot 10^3$, в котором верхний предел в сравнении с методом емкостного делителя оказывается больше в 100 раз. При этом емкость C_3 в такое же число раз должна быть меньше максимального значения неизвестной емкости C_x.

В заключение заметим, что, как и в предыдущем методе, в данном методе выходное напряжение измерительной цепи зависит от величины измеряемой емкости по нелинейному закону, что является нежелательным, т.к. в практической реализации обычно сводится к необходимости построения градуировочных кривых выходного напряжения при подключении к измерительной цепи калиброванных емкостей.

Таким образом, мостовой метод измерения емкости по сравнению с методом емкостного делителя позволяет расширить диапазон измеряемых емкостей во столько раз, во сколько раз отличаются емкости вспомогательного плеча моста C_2 и C_4.

Метод проходного конденсатора операционного усилителя. В работе [12] предложено измерять емкость, подключив ее к инверсионному входу операционного усилителя (ОУ) вместо токозадающего резистора (рис. 1, *в*). Поскольку коэффициент усиления каскада на DA1 равен

$$G = 1 + R_{\text{ос}} / X_c = 1 + \omega C_x R_{\text{ос}} ,$$

то при $G \gg 1$ напряжение на выходе ОУ будет пропорционально величине тестового напряжения $U_{\text{т}}$ и измеряемой емкости C_x:

$$U_{\text{вых}}^{(1)} \cong U_{\text{т}} \omega C_x R_{\text{ос}} .$$

Поскольку частота тестового сигнала обычно составляет 1 МГц, а амплитуда тестового напряжения $U_{\text{т}} < kT/q \approx 26$ мВ, то выбором сопротивления обратной связи $R_{\text{ос}}$ можно задать максимальный коэффициент усиления выбранной микросхемы ОУ.

Важным преимуществом данного метода измерения емкости по сравнению с рассмотренными выше методами является принципиально линейная зависимость выходного напряжения ОУ от величины измеряемой емкости, что кроме расширения динамического диапазона измеряемых емкостей повышает и точность измерений. Однако данный метод имеет недостаток, связанный с зависимостью коэффициента усиления ОУ от частоты тестового сигнала. Его можно устранить, если на выходе ОУ1 установить $R_{\text{д}}C_{\text{д}}$-делитель (см. рис. 1, *в*), коэффициент передачи которого равен

$$\frac{U_{\text{вх}}^{(2)}}{U_{\text{вых}}^{(1)}} = \frac{1/j\omega C_{\text{д}}}{R_{\text{д}} + 1/j\omega C_{\text{д}}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_{\text{д}}} ,$$

где $\tau_{\text{д}} = R_{\text{д}} C_{\text{д}}$ – время перезарядки емкости делителя. Поскольку в данном методе фазовые изменения измерителем не отслеживаются, о величине выходного напряжения можно судить по его модулю, получаемому после квадратичного детектирования напряжения с $R_{\text{д}}C_{\text{д}}$-делителем:

$$\left| \frac{U_{\text{вх}}^{(2)}}{U_{\text{вых}}^{(1)}} \right| = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\text{Re}\left(\frac{U_{\text{вх}}^{(2)}}{U_{\text{вых}}^{(1)}} \right)^2 + \text{Im}\left(\frac{U_{\text{вх}}^{(2)}}{U_{\text{вых}}^{(1)}} \right)^2} = \frac{2/\sqrt{\pi}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_{\text{д}}^2}} .$$

Значит, если выбрать параметр $\tau_{\text{д}}$ достаточно таким, чтобы на низшей частоте измерения емкости $\omega_{\min}$ выполнялось условие: $\omega_{\min} \tau_{\text{д}} = 50 \div 100$, то по известному сопротивлению $R_{\text{д}}$ определим необходимую емкость

$$C_{\text{д}} = \frac{50 \div 100}{\omega_{\min} R_{\text{д}}} .$$

Так, при минимальной частоте измерения 10 кГц, сопротивлении $R_д = 160$ кОм и 1%-й точности измерения на граничной частоте получим $C_д = 1000$ пФ. Тогда в диапазоне $(10 \div 1000)$ кГц

$$\left|\frac{U_{вх}^{(2)}}{U_{вых}^{(1)}}\right| = \frac{2/\sqrt{\pi}}{\sqrt{1+\omega^2\tau_д^2}} \cong \frac{2/\sqrt{\pi}}{\omega\tau_д}.$$

В итоге общий коэффициент усиления измерителя емкости с делителем на его выходе будет

$$G_1 = \omega C_x R_{ос}\left(\frac{1}{\omega R_д C_д}\right) = C_x \frac{R_{ос}}{R_д C_д}.$$

В реальных условиях общий коэффициент усиления этой схемы будет невелик. Поэтому целесообразно на выходе измерителя ВФХ поставить дополнительный ОУ с полосой пропускания – $(10 \div 1000)$ кГц и коэффициентом усиления $G_2 = R_3/R_2 = 100$. На рис. 1, *в* он выполнен на микросхеме DA2. Так удастся расширить диапазон частот измерения полупроводниковой емкости, а также сохранить линейность амплитудной характеристики и высокую точность метода. Динамический диапазон измерителя полупроводниковой емкости может быть расширен применением программного переключения коэффициента усиления G_2 за счет изменения резистора R_3. Окончательное выражение для нахождения неизвестной емкости будет иметь вид

$$C_x = C_д \cdot \left(\frac{U_{вых}^{(2)}}{U_т}\right) \cdot \left(\frac{R_2}{R_3}\right) \cdot \left(\frac{R_д}{R_{ос}}\right). \quad (3)$$

Говоря о динамическом диапазоне измерения емкости данным методом, отметим, что он определяется параметрами ОУ. Так, максимальная емкость $C_x^{(max)}$ может быть найдена из условия, что амплитуда выходного напряжения ОУ равна напряжению питания ОУ:

$$\omega C_x^{(max)} R_{ос} \cdot U_т = V_{пит}.$$

Если напряжение питания составляет 15 В, напряжение тестового сигнала 3 мВ, то на частоте 1 МГц при $R_{ос} = 19$ кОм получим

$$C_x^{(max)} = \frac{V_{пит}}{U_т}\left(\frac{1}{2\pi f \cdot R_{ос}}\right) = \frac{15}{3}\left(\frac{1}{6{,}28 \cdot 10^6 \cdot 10^2}\right) \approx 100 \text{ (пФ)}.$$

Минимальная измеряемая емкость $C_x^{(min)}$ определяется величиной шума на выходе ОУ $U_{шум}$ порядка 3 мВ:

$$C_x^{(min)} = \frac{U_{шум}}{U_т}\left(\frac{1}{2\pi f \cdot R_{ос}}\right) = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3}\left(\frac{1}{6{,}28 \cdot 10^6 \cdot 10^4}\right) \approx 0{,}01 \text{ (пФ)}.$$

Как следует из проведенного расчета, динамический диапазон метода проходного конденсатора составляет почти четыре порядка, что представляется достаточным. Смещение диапазона измеряемых емкостей в сторону больших значений можно достичь уменьшением либо частоты тестового сигнала, что не всегда возможно, либо уменьшением сопротивления в цепи обратной связи операционного усилителя.

Важное преимущество данного метода перед другими – принципиально линейная зависимость выходного напряжения от величины измеряемой емкости остается неизменной во всем диапазоне изменяемых величин.

Амплитудно-фазовый метод измерения. В рассмотренных выше методах измерения полупроводниковой емкости игнорировались активные потери R_x, отражающие наличие в твердом теле механизмов диссипации энергии. Влияние активных потерь на результаты измерения емкости возрастают с понижением частоты тестового сигнала и при $R_x \le 1/\omega C_x$, доминирующим эквивалентным элементом полупроводникового прибора становится его активное дифференциальное сопротивление. Для нахождения двух неизвестных величин: емкости и сопротивления прибора – необходимо два измерения его параметров или их комбинаций. Таковыми целесообразно взять ампли-

туду напряжения тестовой частоты, измеренной на выходе измерительной цепи, например квадратичным детектором, и его фазу φ относительно тестового напряжения $U_{\text{т}}$: $\varphi = \varphi_{\text{т}} - \varphi_x$. Измерение разности фаз возможно фазовым детектором.

Вариант 1. Последующие нахождения реальной и мнимой частей импеданса исследуемого полупроводникового двухполюсника сводятся к умножению амплитуды сигнала измерителя на геометрические функции разности фаз:

$$\mathrm{Re}(U_x) = R_x \cdot J_{\text{т}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}|U_x| \cdot \cos\varphi; \;\; \mathrm{Im}(U_x) = \left(\frac{1}{\omega C_x}\right) \cdot J_{\text{т}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}|U_x| \cdot \sin\varphi.$$

Здесь $J_{\text{т}}$ – ток через измеряемый двухполюсник. Если в качестве источника тестового сигнала использовать генератор тока $J_{\text{т}}$, то неизвестные составляющие импеданса полупроводникового прибора будет найдены по выражениям:

$$R_x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{|U_x|}{J_{\text{т}}} \cdot \cos\varphi; \;\; C_x = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{J_{\text{т}}}{|U_x|} \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot \sin\varphi}\right). \tag{4}$$

Как следует из выражений (4), в данном методе отсутствуют ограничения на величину измеряемой емкости, поскольку последняя определяется синусом разности фаз и потому может меняться от конечной величины до очень больших значений, когда разность фаз приближается к нулю.

Вариант 2. Одна из конкретных реализаций данного подхода к измерению емкости, основанная на методе проходного конденсатора, расширяет метрологические возможности этого метода за счет учета активного сопротивления полупроводникового прибора и использования фазового детектора для разделения напряжения.

В этом случае параллельно емкости C_x подключается активное сопротивление R_x (см. рис. 1, *в*). Тогда вместо емкости на входе ОУ необходимо рассматривать импеданс двухполюсника Z_x:

$$Z_x = \frac{R_x \cdot (1/j\omega C_x)}{R_x + (1/j\omega C_x)} = \frac{R_x}{1+\omega^2\tau_x^2} - j\frac{\omega R_x \tau_x}{1+\omega^2\tau_x^2},$$

где $\tau_x = R_x C_x$. Напряжение на выходе первого ОУ будет

$$U_{\text{вых}}^{(1)} \cong U_{\text{т}}\left[\frac{R_{\text{ос}}}{\mathrm{Re}(Z_x) + j\,\mathrm{Im}(Z_x)}\right] = U_{\text{т}}\left[\frac{R_{\text{ос}}\left(1+\omega^2\tau_x^2\right)}{R_x\left(1-j\omega\tau_x\right)}\right] = U_{\text{т}}\frac{R_{\text{ос}}}{R_x}\left(1+j\omega\tau_x\right).$$

Если частота тестового сигнала мала: $\omega\tau_x \ll 1$, то $U_{\text{вых}}^{(1)} \cong U_{\text{т}} R_{\text{ос}}/R_x$, т.е. на выходе измерительной цепи будет напряжение, обратно пропорциональное активному сопротивлению R_x. Если же частота тестового сигнала велика так, что $\omega\tau_x \gg 1$, то $U_{\text{вых}}^{(1)} \cong jU_{\text{т}}\omega C_x R_{\text{ос}}$, что подтверждает правильность вычислений. Значит, по реальной и мнимой частям напряжения $U_{\text{вых}}^{(1)}$ можно найти эквивалентную емкость и эквивалентное сопротивление полупроводникового прибора:

$$\left(\frac{U_{\text{вых}}^{(1)}}{U_{\text{т}}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\left(\frac{R_{\text{ос}}}{R_x}\right)^2 + \left(\omega C_x R_{\text{ос}}\right)^2} \cdot \exp(j\varphi).$$

Откуда найдем: $\left(\frac{R_{\text{ос}}}{R_x}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left|\frac{U_{\text{вых}}^{(1)}}{U_{\text{т}}}\right| \cdot \cos(\varphi)$; $\left(\omega C_x R_{\text{ос}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left|\frac{U_{\text{вых}}^{(1)}}{U_{\text{т}}}\right| \cdot \sin(\varphi)$.

Окончательные выражения для нахождения компонент двухполюсника будут

$$R_x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left|\frac{U_{\text{т}}}{U_{\text{вых}}^{(1)}}\right| \cdot \left(\frac{R_{\text{ос}}}{\cos(\varphi)}\right); \;\; C_x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left|\frac{U_{\text{вых}}^{(1)}}{U_{\text{т}}}\right| \cdot \frac{\sin(\varphi)}{\omega R_{\text{ос}}}. \tag{5}$$

Вариант 3. С. Другая реализация данного метода, основанная на методе емкостного делителя с вычитанием тестового сигнала из сигнала с измеряемого прибора, описана в работе [4]. Для последовательной схемы замещения емкость и сопротивление получены из следующих выражений:

$$C_x = C_{\text{эт}}\left(\frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\frac{|U_x|}{J_{\text{т}}}\cdot\sqrt{1+\text{tg}^2(\varphi)}}{1-2\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\frac{|U_x|}{J_{\text{т}}}\cdot\sqrt{1+\text{tg}^2(\varphi)}}\right); \quad R_x = \frac{tg(\varphi)}{\omega C_{\text{эт}}}\cdot\left(\frac{C_{\text{эт}}+2C_x}{C_x}\right). \qquad (6)$$

Они показывают, что измерение фазы позволяет значительно расширить диапазон измеряемой емкости, дополняя это возможностью измерения активного сопротивления прибора.

Как показали экспериментальные исследования, в данном методе определяющее влияние на точность измерения емкости оказывает точность определения фазы (в отечественных фазометрах на частоте 1 МГц она составляет величину порядка 1° и больше). Значительную ошибку может внести также квадратичный детектор из-за узкого динамического диапазона, так, даже если он выполнен из современных комплектующих мировых производителей, например, на микросхеме AD536D14.

Использование цифровой техники позволяет расширить диапазон измеряемых параметров двухполюсника, повысить точность их определения, а также уменьшить количество приборов, необходимых для реализации измерителя емкости [13]. На рис. 2 показана блочная структура аппаратно-программного модуля, использующая цифровую технику и программирование. Применение данного модуля позволяет исключить из схемы измерения квадратичный детектор и фазометр, заменив их двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) с буферной памятью и применив программу обработки массивов $U_x(t)$ – временной зависимости напряжения на выходе блока измерения импеданса прибора, например, по методу проходного конденсатора и $U_{\text{т}}(t)$ – $U_x(t)$ – временной зависимости тестового напряжения. Результатом обработки являются амплитуды напряжений – U_x^0 и $U_{\text{т}}^0$, сдвиг фаз между ними φ, а также аналитические выражения для $U_x(t)$ и $U_{\text{т}}(t)$: $U_x(t)=U_x^0\sin(\omega t+\varphi)$ и $U_x(t)=U_x^0\sin(\omega t)$. Последнее позволяет снизить ошибку определения фазы до ошибки измерения напряжения АЦП (до 0,015%).

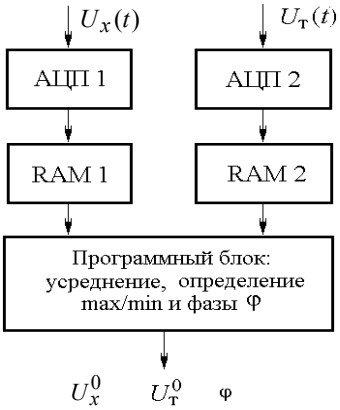

Рис. 2. Аппаратно-программный модуль измерения амплитуды и фазы

На основании проведенного рассмотрения методов измерения эквивалентных параметров приборов можно сделать вывод, что метод проходного конденсатора с дополнением его аппаратно-программным модулем измерения амплитуды и фазы напряжения позволяет создать измеритель параметров полупроводникового прибора с широким диапазоном измерения емкости и сопротивления, высокой точностью измерения, исследовать параметры двухполюсника в широком частотном диапазоне, а также уменьшить массогабариты и стоимость комплекса. Применение микропроцессорной техники и программы управления измерением делает такой комплекс полностью автоматизированным.

Структура автоматизированного комплекса. Разработанный автоматизированный комплекс (АК) предназначен для исследования свойств полупроводниковых приборов: *p–n*-переходов, гетероструктур, МДП-структур, диодов Шоттки и т.д. путем измерения оптимального набора характеристик: ВФХ и ВАХ, фотопроводимости и фотоЭДС, а также флуктуационных свойств исследуемого прибора. Характеристики могут быть измерены в зависимости от таких независимых переменных, как напряжение на двухполюснике требуемой формы, частота тестового сигнала, мощность фоновой засветки, длина волны оптического излучения.

Конструктивно комплекс представляет устройство, состоящее из взаимосвязанных блоков: аналогового блока, оптического блока, цифрового блока, блока коммутации, адаптера «USB 2.0 – Com», зондового устройства, блока питания. Состав отдельных блоков показан на рис. 3.

Аналоговый и цифровой блоки собраны в отдельных корпусах для исключения влияния цифровых наводок на входы аналоговых модулей комплекса. Аналоговый блок представляет собой печатную плату, на которой собраны модули, реализующие на элементном уровне выбранные методики измерения: ВФХ, ВАХ, фотоЭДС и шумового напряжения исследуемого прибора. Переключение модулей аналогового блока в соответствии с заданной программой измерения осуществляет блок коммутации, состоящий из девяти электромагнитных реле со схемой светодиодной индикации состояниями реле. Этими же реле исследуемый полупроводниковый прибор, располагаемый в зондо-

вом устройстве, подключается к аналоговым модулям. Управление их работой осуществляется кодом, генерируемым выходным регистром.

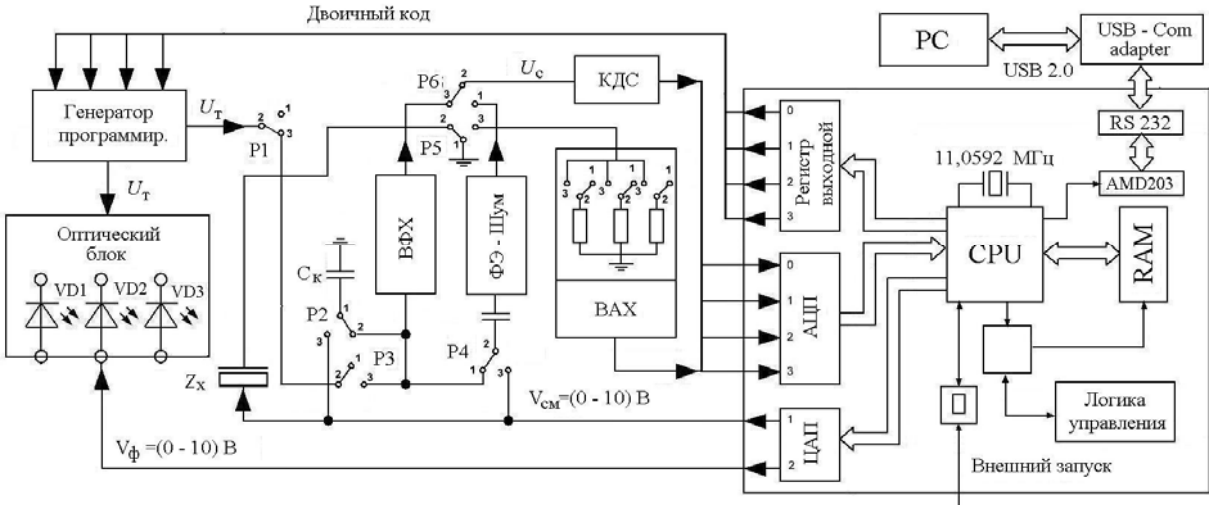

Рис. 3. Блочная структура автоматизированного комплекса

Цифровой блок собран на базе микроконвертора ADuC812, дополненного шестью 8-разрядными выходными регистрами входа и шестью 8-разрядными входными регистрами для работы с внешними устройствами. Микропроцессор чипа принимает команды с центрального процессора – PC и управляет работой мультиплексированным 12-разрядным АЦП, двумя 12-разрядными цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП), регистрами входа и выхода. Поскольку микропроцессор обменивается данными с внешними устройствами по протоколу RS232, который на современных PC заменен на USB 2.0, то для связи микропроцессора ADuC812 с центральным процессором используется адаптер «USB 2.0 – Com», собранный на микросхеме FT232RL.

Помимо аналогового и цифрового модулей в состав АК входит оптический блок, задача которого – засветка исследуемого прибора излучением с требуемыми параметрами при исследовании фотоэлектрических и шумовых характеристик. Для этой цели в корпусе оптического блока размещены светодиоды на длины волн 0,45, 0,55 и 0,64 мкм. Светодиоды переключаются программно и могут работать как в режиме немодулированного излучения регулируемой мощности, так и в режиме модуляции излучения переменным напряжением с частотой от 10 Гц до 1 МГц. Для этого в оптическом блоке размещен программируемый генератор синусоидального напряжения амплитудой 15 В, управляемый, как и переключение светодиодов, двоичным кодом, генерируемым выходным регистром цифрового блока.

Программное обеспечение комплекса включает в себя программу управления процессом измерения перечисленных характеристик при различных значениях параметров, а также программы обработки результатов измерений как по стандартным методикам, так и уникальным. Программы написаны на языках высокого уровня, обеспечивающих наглядный интерфейс пользователя, удобство и простоту управления экспериментом, а также высокую скорость обработки результатов, наглядность их отображения.

Работа с комплексом заключается в загрузке в PC программы измерения, установке в зондовое устройство комплекса исследуемого полупроводникового прибора и последующем управлении процессом измерения по запросам, выдаваемым программой в местах выбора условий измерения и обработки.

Рис. 4. Внешний вид автоматизированного комплекса

Экспериментальные результаты. Экспериментальные исследования светодиодных гетероструктур из InGaN/GaN и фоторезисторов из CdSe и других полупроводниковых приборов показали, что данный автоматизированный комплекс обладает оптимальным набором измерительных возмож-

ностей, удобным конструктивом, а также наглядным пользовательским интерфейсом. При этом достигнуты следующие диапазоны измерения параметров и точности их определения:

– измерение постоянного тока в диапазоне от 10 пА до 6 мкА с точностью 1 пА;

– измерение ВФХ на частотах от 10 кГц до 1 МГц в диапазоне $(0{,}5 \div 4000)$ пФ с точностью не хуже 0,1 пФ;

– диапазон напряжения смещения на исследуемом объекте от –10 до +10 В с точностью выставления 4 мВ;

– диапазон измерения фотоэдс/фотопроводимости от 100 мкВ до 100 мВ в частотном диапазоне от 10 Гц до 100 кГц с точностью 10 мкВ;

– диапазон измерения шумового напряжения от 1 мкВ до 10 мВ с точностью не хуже 1% в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц.

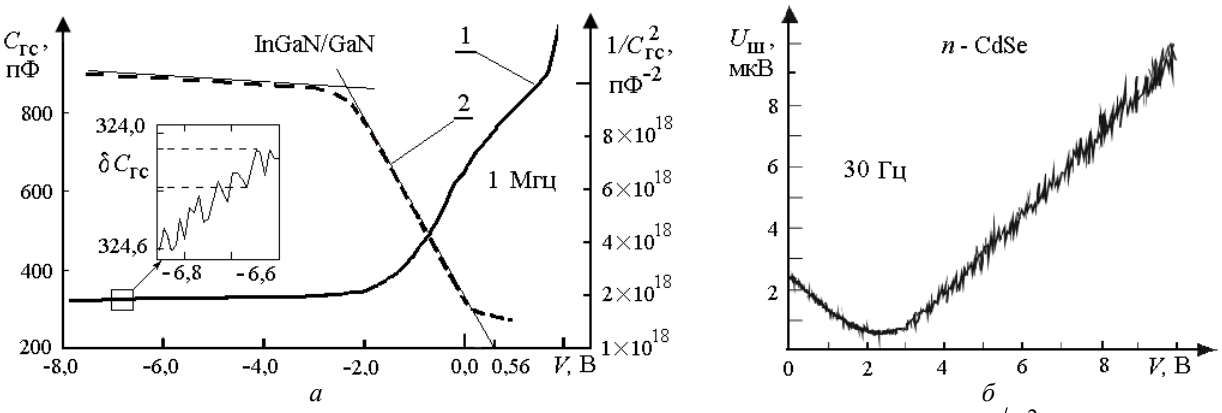

Рис. 5. ВФХ гетероструктуры InGaN/GaN (*1*) и рассчитанная из нее зависимость $1/C^2(V)$ (*2*) – *а*; зависимость шумового напряжения на частоте 200 Гц от напряжения смещения фоторезистора CdSe при фоновой засветке – *б* [16]

В качестве демонстрации метрологических возможностей автоматизированного комплекса и информативности получаемых с его помощью результатов на рис. 5, *а* показана экспериментальная ВФХ гетероструктуры InGaN/GaN фирмы «SemiLED», измеренная на частоте 1 МГц [14]. На вставке к рисунку показан фрагмент ВФХ, доказывающий возможность вычисления энергетического барьера в гетероструктуре и достигнутую точность измерения емкости на уровне 0,05%. На рис. 5, *б* приведена полевая зависимость шумового напряжения фоторезистора [15] из CdSe в условиях фоновой засветки видимым излучением [16]. Из данного рисунка видно, что разработанный комплекс уверенно выделяет шум фоторезистора на фоне аппаратурных шумов в широком диапазоне напряжений смещения, регистрируя также изменение уровня шумового напряжения с изменением мощности фоновой засветки.

Выводы. На основании выполненного обзора информативности различных характеристик полупроводниковых приборов предложен оптимальный набор параметров, исследование зависимостей которых от различных независимых переменных позволяет получить максимальный объем взаимодополняющей информации об электрических свойствах исследуемого прибора. К таким параметрам отнесены: эквивалентная емкость и эквивалентная проводимость двухполюсника, фотоЭДС и фотопроводимость (или обратные им мощность генерируемого электромагнитного излучения), шумовое напряжение, измеряемые в зависимости от напряжения смещения, частоты тестового сигнала, длины волны оптического излучения, мощности фоновой засветки.

Проведено сравнение различных методик измерения полупроводниковой емкости с позиций размеров их частотного и динамического диапазонов, а также точности измерения. Установлено, что для исследования высокочастотной емкости лучшие результаты измерений обеспечивает метод проходного конденсатора в модификации с расширителем его частотных свойств. Для исследования емкости и сопротивления прибора лучшими параметрами обладает амплитудно-фазовый метод совместно с аппаратно-программным блоком на основе АЦП с буферной памятью.

Описана структурная схема разработанного автоматизированного комплекса, реализующего широкие метрологические возможности измерительных методик с высокой точностью измерения,

малыми габаритами и низкой себестоимостью. Указаны основные измеряемые характеристики, диапазоны изменения независимых параметров процесса измерения и достигаемая точность измерения. На примере приведенных результатов экспериментальных исследований емкостных свойств гетероструктур на основе InGaN/GaN и шумов фоторезисторов из CdSe доказана применимость комплекса для учебных целей и научных исследований.

Литература

1. Беляков А.В. Программный комплекс для исследования статистических характеристик шумовых процессов / А.В. Беляков, М.Ю. Перов, А.В. Якимов // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия: Радиофизика. – 2004. – Вып. 2. – С. 143–153.

2. Костюков С.А. Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур / С.А. Костюков, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов и др. // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – С. 61–64.

3. Сергеев В.А. Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик гетеропереходных светодиодов с повышенным разрешением / В.А. Сергеев, И.В. Фролов, А.А. Широков // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 1. – С. 137–138.

4. Войцеховский А.В. Фотоэлектрические МДП структуры из узкозонных полупроводников / А.В. Войцеховский, В.Н. Давыдов. – М.: Сов. радио, 1990. – 327 с.

5. Смирнов В.И. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового импеданса светодиодов / В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков, Д.И. Корунов // Приборы и техника экспериментов. – 2013. – № 1. – С. 135–136.

6. Зубков В.И. Автоматизированная установка для емкостных исследований на базе МЦЕ-13АМ / В.И. Зубков, А.В. Соломонов // Изв. ЛЭТИ. – 1986. – Вып. 365. – С. 97–100.

7. Тревис Дж. LabView для всех / Дж. Тревис. – М.: ДМК; ПриборКомплект, 2004. – 537 с.

8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / пер. с анл. под ред. Р.А. Суриса. – М.: Мир, 1984. – 453 с.

9. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9. – С. 168–174.

10. Давыдов В.Н. Запаздывающие структурные изменения в полупроводниках, стимулированные магнитным полем / В.Н. Давыдов, Е.А. Лоскутова, Е.П. Найден // Физика и техника полупроводников. – 1989. – Т. 23, № 9. – С. 1696–1700.

11. Закгейм А.Л. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaN/GaN-светодиодах / А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров, Н.М. Шмидт // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 2. – С. 219–223.

12. Зайцев Н.Г. Измерение емкости МДП-структуры с помощью дифференцирующего усилителя / Н.Г. Зайцев, В.Н. Давыдов, П.Е. Троян // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2006». 4–7 мая 2006. – Томск: В-Спектр, 2006. – Ч. 4. – С. 77–80.

13. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. – 2-е изд. / пер. с англ. под ред. Е.Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2006. – 394 с.

14. Давыдов В.Н. Профиль концентраций носителей заряда в квантово-размерных гетероструктурах / В.Н. Давыдов, В.Л. Олейник // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2013», 15–17 мая 2013 г. – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 2. – С. 44–49.

15. Мирский Г.Я. Аппаратное определение характеристик случайных процессов. – М.: Энергия, 1972. – 456 с

16. Давыдов В.Н. Шумовые свойства фоторезисторов на основе селенида кадмия при фоновой засветке / В.Н. Давыдов, И.М. Мусина, А.С. Гребенников // Изв. вузов. Физика. – 2012. – № 3. – С. 90–96.

Давыдов Валерий Николаевич
Д-р. физ.-мат. наук, профессор электронных приборов ТУСУРа
Тел.: (8-382-2) 41-35-07
Эл. почта: dvn@fet.tusur.ru

Новиков Денис Александрович
Студент 5-го курса каф. электронных приборов ТУСУРа
Тел.: (8-382-2) 41-35-07
Эл. почта: dvn@fet.tusur.ru

Davydov V.N., Novikov D.A.
Measuring methods and automated system for investigation of opto– and nanoelectronic devices

In the research, we defined a set of complementary features, and implemented their chosen measuring methods, which are used to study the optical and electrical properties of semiconductor devices and structures. The choice of methodology is based on achieving wide frequency and dynamic ranges, high accuracy, and technical ease of implementation and the possibility of automation. The design and measurement capabilities of the developed automated system is described. Experimental studies of the capacitive properties of the InGaN/GaN heterostructures and the noise voltage of CdSe photoresistor confirmed extensive metrological capability and high measurement accuracy of semiconductor devices.
Keywords: automated complex, the method of capacitive divider, bridge method, method of through capacitor, amplitude-phase method, current-voltage characteristics, photoconductivity, noise voltage.