

Е. А. ЕРМОЛЕНКО

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Проведены анализ и обобщение методов измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов. Выделены их основные классификационные признаки и составлена классификация, с использованием которой определены наиболее эффективные методы измерения ВАХ с точки зрения сформулированных в работе критериев (длительность процесса измерения и степень его автоматизации, а также интенсивность саморазогрева полупроводниковых структур при измерениях).

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, полупроводниковый прибор, метод измерения, классификация.

На сегодняшний день полупроводниковые приборы (ПП) получили широкое распространение и применяются практически во всех отраслях техники. Качество, себестоимость и надежность работы ПП зависят от технологического процесса их производства. Одним из наиболее важных этапов этого техпроцесса является контроль качества, который заключается в проверке электрических параметров каждого ПП на соответствие техническим условиям. Контроль качества осуществляется специализированными компьютерными системами, входящими в состав зондовых станций, путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) каждого ПП непосредственно на кремниевой пластине. При этом в число наиболее важных критериев эффективности таких компьютерных систем входят длительность процесса измерения, интенсивность саморазогрева ПП и степень автоматизации процесса измерения.

Следует отметить, что компьютерные системы измерения ВАХ используются не только на производстве, но и для других задач, например для подбора дискретных полупроводниковых приборов с максимально близкими параметрами, где эффективность процесса измерения не менее важна.

В работах известных специалистов по данной тематике показано, что с точки зрения перечисленных критериев эффективность компьютерных систем измерения ВАХ зависит не только от их аппаратных средств, но и от методов измерения [1–5]. При этом отсутствуют работы, в которых были бы обобщены сведения о существующих методах измерения ВАХ или четко выделены признаки, на основе которых можно их классифицировать, и это затрудняет выбор метода измерения ВАХ для достижения максимальной эффективности процесса измерения.

Целью настоящей работы является анализ и обобщение существующих методов измерения ВАХ ПП и их классификация с последующим выявлением наиболее эффективных решений с точки зрения перечисленных выше критериев.

Авторы зарубежных публикаций часто придерживаются следующей классификации методов измерения ВАХ [1, 6–10]:

- статические (или непрерывные) методы (static measurements, DC-measurements);
- динамические (или импульсные) методы (dynamic IV measurements, pulsed IV measurements).

Статические методы измерения ВАХ предусматривают подачу на исследуемый ПП электрических измерительных воздействий*, непрерывно изменяющихся во времени. Динамические методы предусматривают подачу на исследуемый ПП коротких импульсов, во время действия которых измеряется отклик прибора. Однако подобной классификации не поддается метод, при котором на один из выводов трехэлектродного ПП подается непрерывный сигнал, а на другой — импульсный (например, при снятии серии выходных ВАХ транзистора [4, 11]).

Кроме того, среди работ по данной тематике существует неоднозначность в определении импульсного метода. Например, в [1, 5–7] импульсным считается метод, когда при измерении ВАХ задается постоянный режим покоя ПП (с т. н. точкой покоя, в зарубежной литературе — «quiescent point», «Q-point» или «bias point»), в котором находится прибор в моменты отсут-

* Здесь и далее под измерительным воздействием будем понимать электрический сигнал (напряжение или ток) амплитудой A , который подается на тестируемый ПП с целью измерения его отклика.

ствия измерительных воздействий. В этом случае воздействующий сигнал имеет форму импульсов и одновременно является непрерывным во времени.

Таким образом, к недостаткам рассмотренной классификации можно отнести отсутствие четких критериев, по которым можно определить принадлежность метода к тому или иному виду. Кроме того, классификация методов измерения ВАХ только по форме измерительных воздействий не дает информации о других важных аспектах, таких как состояние ПП во время измерения, средства, с помощью которых может осуществляться тот или иной метод, и др.

Существуют также публикации, где в зависимости от состояния ПП во время измерений ВАХ выделяют изотермические и изодинамические методы [1, 2, 5, 6].

Изотермическими называют измерения, при которых температура ПП поддерживается приблизительно на одинаковом уровне. Основная их цель — предотвращение непрерывного роста температуры ПП вследствие саморазогрева, что способствует уменьшению тепловых искажений ВАХ и может существенно увеличить точность результатов. Как правило, изотермические измерения ВАХ осуществляются при применении импульсных методов [1, 2].

Изодинамические измерения проводятся таким образом, чтобы заряд, обусловленный эффектом захвата носителей на паразитных энергетических уровнях ПП, в процессе измерения ВАХ оставался неизменным. Основная цель изодинамических измерений — повышение точности измерения ВАХ путем предотвращения или стабилизации эффекта захвата носителей [1, 4–7, 10, 12, 13]. Как правило, изодинамическое со-

стояние ПП в процессе измерения его ВАХ поддерживается благодаря использованию импульсных методов с применением очень малых длительностей импульсов (200 нс — 2 мкс) [1, 5, 6].

Среди отечественных публикаций наиболее полной является классификация методов измерения ВАХ, приведенная в [7]: в зависимости от инерционности измерительных средств, а также скорости и характера изменения подаваемых воздействий методы измерения ВАХ разделяются на статические, динамические и квазистатические, осуществляемые вручную или автоматически. К недостаткам такой классификации можно отнести неоднозначность определений каждого метода измерения ВАХ и отсутствие объективных критериев, по которым можно было бы однозначно идентифицировать тот или иной метод.

Таким образом, анализ зарубежных и отечественных публикаций показал, что существует множество различных, отличающихся между собой по ряду признаков, методов измерения ВАХ ПП:

- статические [6, 14–16];
- динамические [1, 4, 6–9, 11, 14, 17–19];
- методы, ориентированные на измерение ВАХ двух- или трехэлектродных ПП [11, 16, 20];
- специализированные методы для ПП, ВАХ которых имеет участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением [21, 22];
- методы с учетом либо контролем теплового состояния ПП во время измерения [1, 2, 23];
- методы с использованием математических вычислений или статистической обработки результатов измерения для получения характеристики [6, 23–25];
- различные автоматизированные методы, для реализации которых требуется специали-

Классификационные признаки

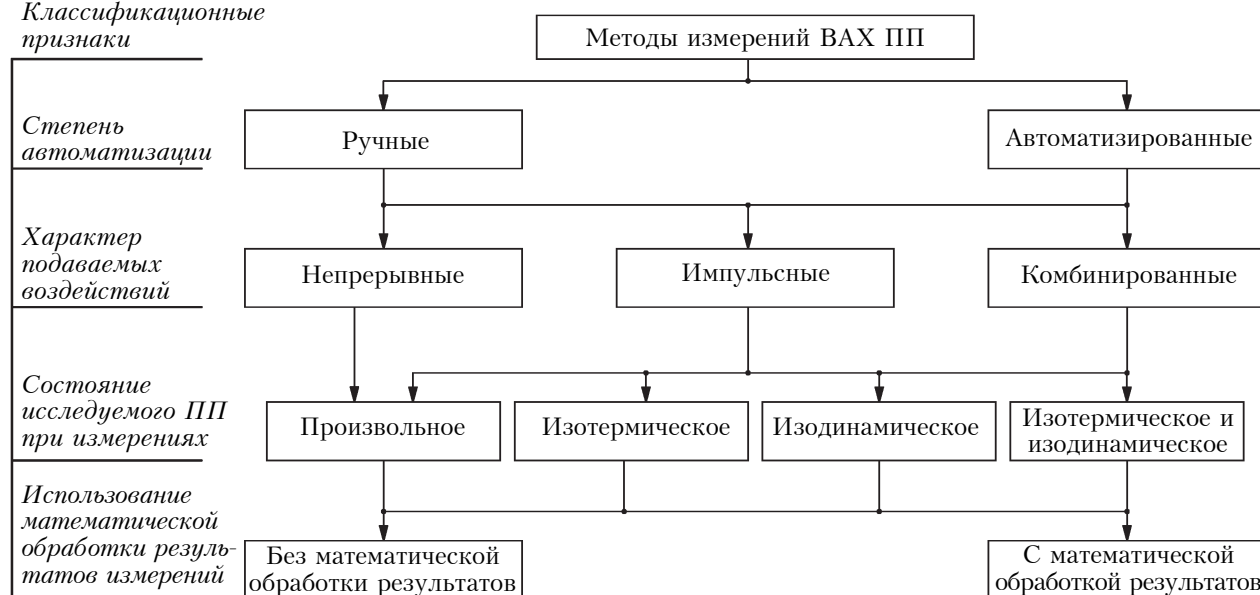


Рис. 1. Классификация методов измерения ВАХ ПП

зированное оборудование [8, 9, 14, 16, 18–20, 24, 26, 27 и др.].

Проведенный анализ позволил выделить основные классификационные признаки и составить классификационную схему методов измерения ВАХ, показанную на **рис. 1**.

Классификация по степени автоматизации

Поскольку все методы измерения ВАХ основываются на измерении токов и напряжений, наиболее общим классификационным признаком можно назвать степень их автоматизации. В соответствии с этим признаком все методы измерения ВАХ можно разделить на ручные и автоматизированные. Подобное разделение характеризует не только долю участия человека в измерительном процессе, но и средства, с помощью которых могут проводиться измерения ВАХ.

Ручные методы измерения ВАХ предполагают, прежде всего, ручное управление источниками измерительных сигналов, а также ручную регистрацию откликов исследуемого ПП, и могут отличаться между собой характером подаваемых воздействий. Ручные методы наименее эффективны с точки зрения саморазогрева ПП и длительности процесса измерений.

В *автоматизированных методах* измерения ВАХ выполнение некоторых трудоемких операций (таких как подача измерительных воздействий, регистрация откликов ПП и пр.) осуществляется автоматически с помощью специальных аппаратных средств. В качестве аппаратных средств, позволяющих автоматизировать процесс измерения ВАХ, могут использоваться различные приборы и устройства. Такими устройствами могут быть осциллографы, различные приставки, позволяющие расширять их функциональные возможности (например, выводить на экран осциллографа серии ВАХ трехэлектродных ПП) [16, 24, 28], а также специализированные компьютерные системы, в которых управление процессом измерения ВАХ и обработку зарегистрированных данных осуществляет микроконтроллер или персональный компьютер [29]. Применение микропроцессорной техники позволяет разносторонне обрабатывать данные, полученные в процессе измерений, не подвергая прибор непрерывным электрическим воздействиям. Благодаря программно-управляемым аппаратным средствам такие измерительные системы, как правило, характеризуются высоким быстродействием и точностью.

Автоматизированные методы реализуются различными измерительными системами, возможности которых ограничены только возможностями элементной базы их аппаратных средств. Однако эффективность этих систем в значительной мере зависит от характера измерительных воздействий, подаваемых на ПП в процессе измерения ВАХ. Поэтому вторым и наиболее важным классификационным признаком является характер подаваемых воздействий, по которому все

методы измерения ВАХ ПП можно разделить на непрерывные, импульсные и комбинированные.

Классификация по характеру подаваемых измерительных воздействий

Непрерывные методы: при измерении ВАХ на ПП последовательно подаются непрерывные во времени измерительные воздействия с постепенно изменяющейся амплитудой. В зависимости от типа тестируемого ПП и используемых средств измерения ВАХ форма таких воздействий может отличаться.

Наиболее часто среди непрерывных методов измерения ВАХ применяется метод со ступенчато изменяющейся амплитудой измерительных воздействий (**рис. 2, а, б**) [6, 14, 15]. При этом, как правило, используются цифровые аппаратные средства, а измерения ВАХ могут реализовываться различными компьютерными системами [30–32].

Следует отметить, что существуют модификации такого метода измерения ВАХ, адаптированные для определенных типов ПП. Так, например, в [21] описывается метод измерения нелинейной ВАХ ПП с участками отрицательного дифференциального сопротивления (например, тиристоров). Для перехода таких ПП в проводящее состояние необходим импульс включения. Соответственно, при измерении ВАХ непрерывным методом этот импульс должен предшествовать измерительным воздействиям (**рис. 2, в**) [21].

Еще одним примером непрерывных методов измерения ВАХ является так называемый осциллографический метод, когда в качестве источника измерительных воздействий используется аналоговый генератор или специальные приставки к осциллографам для снятия серий характеристик [24]. В этом случае характер измерительных воздействий может иметь пилообразную или синусоидальную форму (**рис. 2, г**).

Основной недостаток непрерывных методов измерения ВАХ заключается в том, что в процессе измерения через исследуемый ПП постоянно

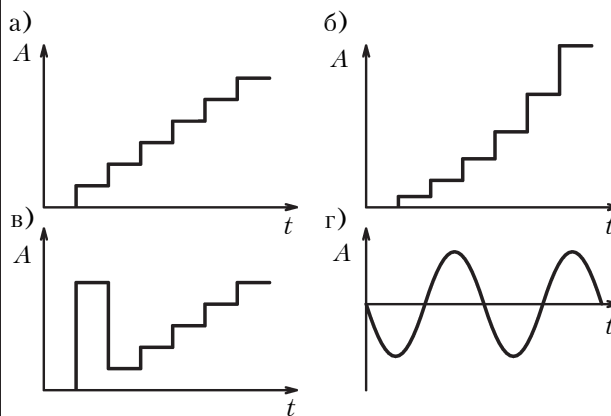


Рис. 2. Формы измерительных воздействий, прикладываемых к ПП в соответствии с непрерывными методами измерения ВАХ

протекает ток, причем амплитуда его может все время увеличиваться. Это приводит к накоплению тепла в структуре тестируемого прибора, что вызывает искажение ВАХ и возникновение методической погрешности. Данная погрешность наиболее сильно будет выражена при тестировании силовых приборов, а также при многократном измерении характеристик одного и того же ПП (например, при снятии серий ВАХ транзистора). Нагрев полупроводниковой структуры приводит не только к искажению ВАХ, но и к ограничению возможного диапазона измерения. Помимо этого, при использовании непрерывных методов измерения ВАХ наиболее сильно выражено влияние эффекта захвата носителей тока на результаты измерений [1, 4, 6, 7, 10, 12].

Импульсные методы: при измерении ВАХ на ПП подается последовательность измерительных импульсов различной амплитуды, в паузах между которыми электрические воздействия на ПП отсутствуют. Точки ВАХ определяются путем регистрации отклика тестируемого ПП во время действия каждого импульса. В связи с тем, что ток через исследуемый прибор протекает только в моменты действия измерительных импульсов, снижается по сравнению с непрерывными методами и общий нагрев прибора, и влияние эффекта захвата носителей в ПП [1, 4–7]. В зависимости от типа тестируемого ПП и используемых средств измерения ВАХ, форма импульсных измерительных воздействий может быть различной.

Среди существующих импульсных методов измерения ВАХ наиболее распространенным является метод, согласно которому на ПП подается последовательность прямоугольных измерительных импульсов с возрастающей амплитудой (рис. 3, а) [1, 8, 11, 14, 17, 18, 21]. При этом длительность импульсов и длительность пауз между ними в процессе измерения ВАХ остаются постоянными. При измерении ВАХ трехэлектродного ПП такой метод предусматривает по-

дачу импульсных воздействий как на его входные цепи, так и на выходные.

Модификацией описанного метода является метод, согласно которому амплитуда воздействующих импульсов в процессе измерения ВАХ варьируется в случайном порядке в пределах заданного пользователем диапазона (рис. 3, б). Такой метод используется для экспериментального подбора параметров импульсных воздействий [1].

Импульсные методы, как и непрерывные, используются при тестировании ПП, ВАХ которых имеет участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В этом случае каждому измерительному импульсу предшествует отпирающий импульс большей амплитуды (рис. 3, в) [21].

Импульсный метод измерения также находит свое применение в специализированных приставках, позволяющих измерять и наблюдать на экране осциллографа серии ВАХ, полученные с применением импульсной модуляции пилообразного или синусоидального воздействующего сигнала генератора (рис. 3, г) [19].

Импульсные методы измерения ВАХ широко распространены и реализовываются, как правило, компьютерными системами. Разные системы измерения позволяют формировать импульсные последовательности с различной длительностью импульсов и пауз между ними (от нескольких сотен наносекунд до единиц миллисекунд). Однако среди зарубежных и отечественных публикаций достаточно сложно найти работы, в которых давались бы однозначные и непротиворечивые рекомендации по выбору параметров импульсной последовательности для наиболее эффективного измерения ВАХ. Поскольку различные ПП обладают различными физическими свойствами, параметры импульсной последовательности, приемлемые для одних ПП, могут быть неэффективными для других. Например, при измерении ВАХ быстродействующего прибора выбранная длительность импульса может быть избыточной, что приведет к излишнему самонагреву ПП. Помимо длительности импульса эффективность процесса измерения ВАХ импульсным методом также зависит от длительности паузы, поскольку она оказывает непосредственное влияние на длительность всего процесса измерения и на величину самонагрева ПП. Так, в зависимости от тепловых свойств тестируемого ПП выбранная длительность пауз между воздействующими импульсами может оказаться недостаточной для полного остывания полупроводникового кристалла к моменту прихода следующего импульса, что приведет к накоплению тепла в структуре ПП [33–35].

Таким образом, с точки зрения снижения самонагрева ПП и уменьшения интенсивности захвата носителей импульсные методы позволяют осуществлять измерение ВАХ более эффек-

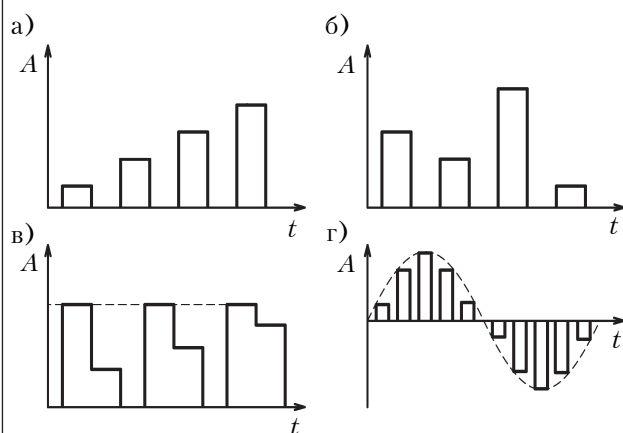


Рис. 3. Формы измерительных воздействий, прикладываемых к ПП в соответствии с импульсными методами измерения ВАХ

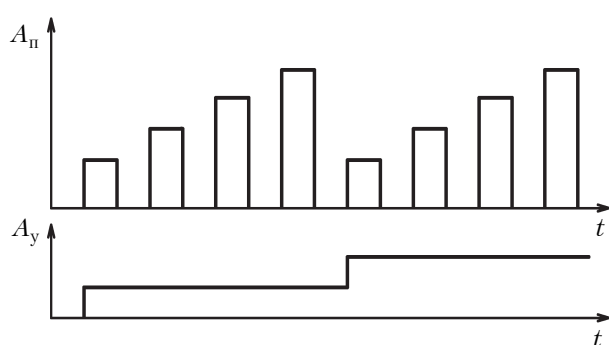


Рис. 4. Форма измерительных воздействий для снятия серий выходных характеристик транзистора комбинированным методом

тивно, чем непрерывные, в особенности при использовании быстродействующих компьютеризированных измерительных систем.

На решение задачи выбора длительности импульсов и длительности пауз между ними направлен адаптивный метод измерения ВАХ, предложенный в [36] и позволяющий автоматически выбирать их величину исходя из индивидуальных свойств тестируемого ПП. Адаптивный метод позволяет сократить длительность измерений и уменьшить саморазогрев ПП.

Комбинированные методы: при измерении ВАХ на ПП подается последовательность измерительных импульсов различной амплитуды, причем подаваемый хотя бы на один из электродов сигнал непрерывен во времени. Одним из примеров использования комбинированных методов является измерение ВАХ трехэлектродного ПП, представляющей собой функцию двух параметров, один из которых варьируется, а второй остается постоянным. Например, при снятии серии выходных характеристик транзистора питающие воздействия A_n в выходной цепи транзистора могут представлять собой импульсы с варьируемой амплитудой, а постоянное управляющее воздействие A_y во входной цепи — не-

прерывный сигнал (рис. 4). Такие комбинированные методы описаны в [4, 11, 37].

Еще одним примером комбинированных методов измерения ВАХ являются вышеупомянутые методы с точкой покоя Q-point [1, 5–7], относительно которой при измерении ВАХ формируется амплитуда измерительных импульсов. Таким образом, электрический сигнал, воздействующий на ПП, является непрерывным во времени и в то же время носит импульсный характер (рис. 5, а). При измерении таким методом ВАХ трехэлектродных ПП (например, выходных характеристик транзистора) форма питающих воздействий A_n в выходной цепи транзистора может быть непрерывной, а управляющих воздействий A_y во входной цепи — импульсной (рис. 5, б) [9].

Необходимость в таких методах измерения обусловлена влиянием на характеристики ПП эффекта захвата носителей тока. Степень этого влияния пропорциональна величине постоянного электрического сигнала, воздействующего на ПП, поэтому характеристики одного и того же ПП в различных режимах его работы могут отличаться [1, 5, 10]. Соответственно, ВАХ, измеренная при одном режиме работы ПП, может недостаточно точно характеризовать его работу в другом режиме в составе какого-либо устройства. Эта особенность может быть важна при подборе ПП для усилительных каскадов, предусматривающих его работу в заданном активном режиме. Поэтому для получения ВАХ, максимально точно характеризующей тот режим работы ПП, в котором он будет работать в конечном устройстве, используют комбинированные методы измерения с точкой покоя. В этом случае постоянное смещающее воздействие Q-point позволяет поддерживать интенсивность захвата носителей в структуре ПП на заданном уровне, а короткие измерительные импульсы — достичь меньшего саморазогрева ПП по сравнению с непрерывными методами. Измерения ВАХ такими методами используются также для количественной оценки интенсивно-

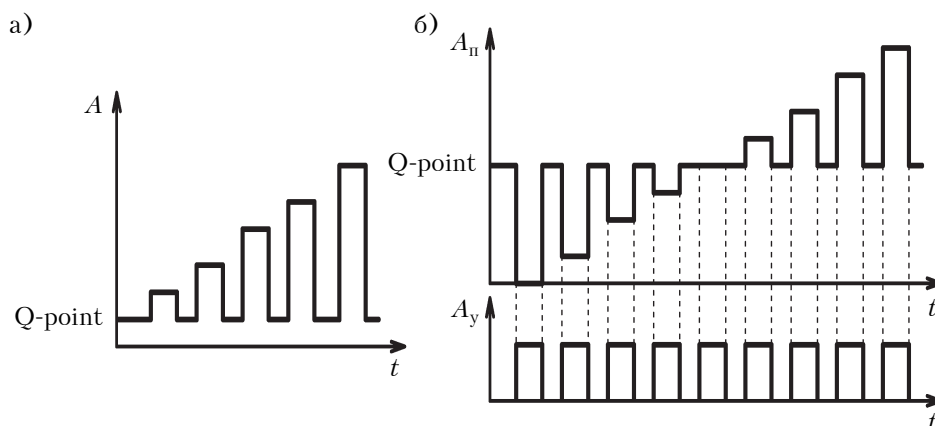


Рис. 5. Форма электрических сигналов, воздействующих на двухэлектродный (а) и трехэлектродный (б) ПП при измерении ВАХ комбинированным методом с точкой покоя

сти захвата носителей в ПП по величине отклонения измеренных характеристик [1, 4, 5, 12].

Таким образом, с точки зрения влияния на саморазогрев исследуемого ПП комбинированные методы измерения ВАХ занимают промежуточное место между непрерывными и импульсными, поскольку процесс измерения осуществляется при температуре, определяемой величиной постоянной составляющей воздействующего сигнала. Подобно импульсным, эффективность комбинированных методов измерения существенно зависит от выбора параметров измерительной импульсной последовательности, а также степени их соответствия индивидуальным свойствам исследуемого ПП.

Классификация по состоянию исследуемого прибора во время измерений

Немаловажным классификационным признаком, характеризующим влияние дестабилизирующих факторов, является то, в каком состоянии находится исследуемый ПП во время измерения ВАХ: в произвольном, изотермическом, изодинамическом или одновременно в изотермическом и изодинамическом состоянии.

Методы с произвольным состоянием ПП: в процессе измерения ВАХ не предотвращается ни саморазогрев тестируемого прибора, ни захват носителей тока в его структуре. К таким методам относятся непрерывные методы измерения ВАХ, а также импульсные и комбинированные методы в тех случаях, когда параметры формируемой измерительной импульсной последовательности задаются без учета инерционных и тепловых свойств тестируемого ПП. Такие несоответствия могут приводить как к саморазогреву ПП, так и к захвату носителей тока.

Методы с изотермическим состоянием ПП: при измерении ВАХ температура ПП остается приблизительно на одном и том же уровне благодаря использованию коротких импульсных измерительных воздействий. Очевидно, что изотермическое состояние ПП могут обеспечить только импульсные и комбинированные методы измерения ВАХ при условии правильного выбора параметров измерительной импульсной последовательности и использовании быстродействующих измерительных систем для их реализации.

Методы с изодинамическим состоянием ПП: при измерении ВАХ заряд, накапливаемый в его структуре в результате захвата носителей, остается неизменным. Как и изотермическое, изодинамическое состояние ПП достигается путем использования коротких воздействующих импульсов и может реализовываться только импульсными и комбинированными методами. В зависимости от выбора параметров этих воздействий импульсные методы допускают возможность предотвращения захвата носителей тока, в то время как комбинированные методы позволяют лишь поддерживать его интенсивность на заданном уровне.

Методы, предусматривающие одновременно и изотермическое, и изодинамическое состояние ПП в процессе измерения ВАХ, соответственно, предполагают постоянство как температуры, так и захвата носителей тока в его структуре, и являются наиболее эффективными.

Классификация по использованию математической обработки результатов измерений

Среди всех методов измерения ВАХ, независимо от характера подаваемых воздействий или состояния ПП, можно выделить методы с математической обработкой результатов измерений и без таковой. Под математической обработкой понимается осуществление любых математических операций над результатами измерений с целью получения ВАХ. Как правило, такие вычисления представляют собой либо математическую коррекцию измеренных величин, либо статистическую обработку результатов измерения.

Например, в [6] описывается комбинированный метод измерения ВАХ, согласно которому для получения каждой точки ВАХ на ПП подается несколько одинаковых измерительных воздействий, измеряются отклики прибора на них, после чего вычисляется среднее значение измеренных величин. В [23] описывается метод математической коррекции ВАХ транзистора, подверженной искажениям вследствие его саморазогрева. Также известны методы, предусматривающие получение ВАХ двухэлектродного ПП путем ее математического вычисления по измеренным параметрам [25].

Достоинство методов с математической обработкой результатов измерений заключается в том, что применение математического аппарата в некоторых случаях позволяет компенсировать погрешности измерений и повысить достоверность результатов без использования дорогостоящих прецизионных аппаратных средств. Как правило, такие методы измерения ВАХ реализовываются с применением компьютеризированных измерительных систем.

Выводы

Согласно предложенной классификационной схеме, методы измерения ВАХ полупроводниковых приборов можно классифицировать по степени автоматизации, характеру подаваемых воздействий, по состоянию исследуемого ПП во время измерений и по использованию математической обработки результатов измерений.

В результате анализа существующих методов измерения ВАХ ПП установлено, что с точки зрения таких критериев, как длительность процесса измерения и степень его автоматизации, а также интенсивность саморазогрева ПП при измерениях, наиболее эффективными являются автоматизированные импульсные методы, при которых ПП находится в изотермическом и изодинамическом состоянии. Такие методы, как

правило, реализовываются быстродействующими компьютерными системами измерения ВАХ с осуществлением математической обработки результатов измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Parker A., Rathmell J., Scott J. Pulsed measurements. — Boca Raton: CRC Press, Inc., 2003.
2. Parker A., Scott J., Rathmell J., Sayed M. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements // IEEE MTT-S International Symposium Digest. — USA, San Francisco. — 1996. — P. 1707—1710.
3. Seok J., Roblin P., Sunyoung L. Pulsed-IV pulsed-RF measurements using a large signal network analyzer // ARFTG Conference Digest 65th. — USA, Cincinnati. — 2005. — P. 26—32. DOI: 10.1109/ARFTGS.2005.1500578
4. Rathmell J., Parker A. Characterizing charge trapping in microwave transistors // SPIE Proceedings. Vol. 6035: Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II. — 2006. — 9 p. DOI: 10.1117/12.638348
5. Scott J., Rathmell J., Parker A., Sayed M. Pulsed device measurements and applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1996. — Vol. 44, N 12. — P. 2718—2723.
6. Baylis C., Dunleavy L. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements // High Frequency Electronics. — 2004. — Vol. 3, N 5. — P. 64—69.
7. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization // Keithley whitepaper. — 2008. — Vol. 9. — P. 1—5.
8. Pat. 7616014 USA. Pulsed I-V measurement method and apparatus / Gregory Sobolewski. — 10.11.2009.
9. Pat. 7280929 USA. Method and apparatus for pulse I-V semiconductor measurements / Yuegang Zhao. — 09.10.2007.
10. Harris H., Laskar J., Nuttinck S. Engineering support for high power density gallium nitride microwave transistors / Georgia Institute of Technology. — Atlanta, 2001.
11. Pat. 7230444 USA. Method for measuring characteristics of FETs / Noboru Saito. — 12.06.2007.
12. Keithley Instruments. Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics. <http://www.keithley.com/data?asset=50323>. (10.09.2012)
13. Keithley Instruments. Wafer Level Reliability Systems <http://www.keithley.com/data?asset=52574>. (11.09.2012)
14. Глинченко А. С., Егоров Н. М., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий. — Москва: ДМК Пресс, 2008.
15. Pat. 5406217 USA. Method of measuring the current-voltage characteristics of a DUT / Satoshi Habu. — 11.04.1995.
16. Pat. 148037 Poland. Sposób pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych przyrządów półprzewodnikowych, zwłaszcza tranzystorów / Jerzy Kuchta, Henryk Rzepa. — 15.06.1987.
17. Kaczinsky J., Newman D., Gaggl R. Aspects of high power probing // IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop. — USA, San Diego. — 2011.
18. Кудреватых Е. Ф. Виртуальный измеритель вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов АСС-4211 // Контрольно-измерительные приборы и системы. — 2002. — № 1. — С. 17—19.
19. Pat. 1227113 GB. Improvements in or relating to apparatus for measuring and displaying current-voltage characteristics / NEC Limited. — 07.04.1971.
20. А. с. 1095114 СССР. Устройство для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов / М.А.Лякас, А.Н.Привитень. — 30.05.1984.
21. Pat. 1464968 EU. A method for determining the current-voltage characteristic of snap-back device / Natarajan Mahadeva. — 06.10.2004.
22. Пат. 2024031 России. Устройство для измерения параметров полупроводниковых приборов с S-образной ВАХ / Н.Г. Чернобровин, М.Н. Пиганов. — 30.11.1994.
23. Pat. 8108175 USA. Method for determining self-heating free I-V characteristics of a transistor / Oiang Chen, Zhi-Yuan Wu. — 31.01.2012.
24. Pat. 2896168 USA. Transistor characteristic curve tracers / Donald E. Thomas. — 21.07.1959.
25. А. с. 894613 СССР. Способ определения вольт-амперной характеристики двухполюсника / Кукушкин В.В., Соляков В.Н. — 30.12.1981.
26. Pat. 4456880 USA. I-V curve tracer employing parametric sampling / Warner T., Cox C. — 26.06.1984.
27. Pat. 4467275 USA. DC characteristics measuring system / Koichi Maeda, Haruo Ito. — 21.08.1984.
28. International Rectifier. Application Note AN-957. Measuring HEXFET MOSFET Characteristics <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-957.pdf>. (12.10.2011)
29. Ермоленко Е.А., Бондаренко А.Ф. Компьютерная система для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов с удаленным доступом // Тр. 14-й МНПК «СИЭТ-2013». Т. I. — Украина, г. Одесса. — 2013. — С. 113—114.
30. Сковрцов С. Высокопроизводительные измерительно-питающие устройства компании Кейтли для тестирования электронных компонентов и интегральных схем // Chip-News. — 2005. — № 7. — С. 30—32.
31. Agilent Technologies. E5260A 8 Slot High speed Measurement Mainframe <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1356EN.pdf>. (19.03.2012)
32. Agilent Technologies. B1530A Waveform Generator Fast Measurement Unit <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8378EN.pdf>. (10.09.2011)
33. Давидов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. — Москва: Энергия, 1967.
34. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. — Москва: Энергоатомиздат, 1985.
35. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. — Москва: Энергоатомиздат, 1990.
36. Пат. 96998 України. Спосіб автоматизованого вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів. / О. Ф. Бондаренко, Є. О. Ермоленко. — 2011. — Бюл. № 24.
37. Pat. 2004/034071 GB. Semiconductor monitoring instrument / Ladbroke Peter, Goodship Neil. — 22.04.2004.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 24.12.2013 г.*

Є. О. ЄРМОЛЕНКО

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Проведено аналіз та узагальнено методи вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приладів. Виділено їх основні класифікаційні ознаки та складено класифікацію, з використанням якої визначено найбільш ефективні методи вимірювання ВАХ з точки зору сформульованих в роботі критеріїв (тривалість процесу вимірювання та ступінь його автоматизації, а також інтенсивність саморозігріву напівпровідникових структур при вимірюваннях).

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, напівпровідниковий прилад, метод вимірювання, класифікація.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.03
UDC 621.317: 621.3.08

Іє. О. ІЕРМОЛЕНКО

Ukraine, Alchevsk, Donbas State Technical University
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

CLASSIFICATION OF METHODS FOR MEASURING CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

It is shown that computer systems for measuring current-voltage characteristics are very important for semiconductor devices production. The main criteria of efficiency of such systems are defined. It is shown that efficiency of such systems significantly depends on the methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices. The aim of this work is to analyze existing methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices and to create the classification of these methods in order to specify the most effective solutions in terms of defined criteria.

To achieve this aim, the most common classifications of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices and their main disadvantages are considered. Automated and manual, continuous, pulse, mixed, isothermal and isodynamic methods for measuring current-voltage characteristics are analyzed. As a result of the analysis and generalization of existing methods the next classification criteria are defined: the level of automation, the form of measurement signals, the condition of semiconductor device during the measurements, and the use of mathematical processing of the measurement results. With the use of these criteria the classification scheme of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices is composed and the most effective methods are specified.

Keywords: current-voltage characteristic, semiconductor device, method of measurement, classification.

REFERENCES

1. Parker A., Rathmell J., Scott J. *Pulsed measurements*, Boca Raton, CRC Press, Inc., 2003.
2. Parker A., Scott J., Rathmell J., Sayed M. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements. *IEEE MTT-S International Symposium Digest*, USA, San Francisco, 1996, pp. 1707–1710.
3. Seok J., Roblin P., Sunyoung L. Pulsed-IV pulsed-RF measurements using a large signal network analyzer. *ARFTG Conference Digest 65th*, USA, Cincinnati, 2005, pp. 26–32. DOI: 10.1109/ARFTGS.2005.1500578
4. Rathmell J., Parker A. Characterizing charge trapping in microwave transistors. *SPIE Proceedings*, vol. 6035: Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II, 2006, 9 p. DOI: 10.1117/12.638348
5. Scott J., Rathmell J., Parker A., Sayed M. Pulsed device measurements and applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, vol. 44, no 12, pp. 2718–2723.
6. Baylis C., Dunleavy L. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements. *High Frequency Electronics*, 2004, vol. 3, no 5, pp. 64–69.
7. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization. *Keithley whitepaper*, 2008, vol. 9, pp. 1–5.
8. USA patent 7616014. *Pulsed I-V measurement method and apparatus*, Gregory Sobolewski, 10.11.2009.
9. USA patent 7280929. *Method and apparatus for pulse I-V semiconductor measurements*. Yuegang Zhao, 09.10.2007.
10. Harris H., Laskar J., Nuttinck S. *Engineering support for high power density gallium nitride microwave transistors*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2001, 119 p.
11. USA patent 7230444. *Method for measuring characteristics of FETs*, Noboru Saito 12.06.2007.
12. Keithley Instruments. *Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics*. Available at: <http://www.keithley.com/data?asset=50323>. (10.09.2012)
13. Keithley Instruments. *Wafer Level Reliability Systems*. Available at: <http://www.keithley.com/data?asset=52574>. (11.09.2012)
14. Glinchenko A. S., Egorov N. M., Komarov V. A., Sarafanov A. V. *Issledovanie parametrov i kharakteristik*

poluprovodnikovykh priborov s primeneniem internet-tehnologii [Research of parameters and characteristics of semiconductor devices with the use of Internet technologies] Moscow, DMK Press, 2008, 352 p. (in Russian)

15. USA patent 5406217. *Method of measuring the current-voltage characteristics of a DUT*. Satoshi Habu, 11.04.1995.

16. Poland patent 148037. *Sposyb pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych przyrządów pylprzewodnikowych, zwłaszcza tranzystorów*, Jerzy Kuchta, Henryk Rzepa 15.06.1987.

17. Kaczinsky J., Newman D., Gaggi R. Aspects of high power probing. *IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop*, USA, San Diego, 2011.

18. Kudrevatykh E. F. [Virtual meter ACC-4211 for measurement of current-voltage characteristics of semiconductor devices] *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy*, 2002, no 1, pp. 17–19 (in Russian)

19. GB patent 1227113. *Improvements in or relating to apparatus for measuring and displaying current-voltage characteristics*, NEC Limited, 07.04.1971.

20. USSR patent 1095114. [An apparatus for the study of semiconductor devices current-voltage characteristics] M.A.Lyakas, A.N.Priviten', 30.05.1984.

21. EU patent 1464968. *A method for determining the current-voltage characteristic of snap-back device*. Natarajan Mahadeva, 06.10.2004.

22. RU patent 2024031. [Device for measuring the parameters of semiconductor devices with an S-shaped CVC] N.G. Chernobrovin, M.N. Piganov, 30.11.1994.

23. USA patent 8108175. *Method for determining self-heating free I-V characteristics of a transistor*. Oiang Chen, Zhi-Yuan Wu, 31.01.2012.

24. USA patent 2896168. *Transistor characteristic curve tracers*. Donald E. Thomas, 21.07.1959.

25. USSR patent 894613. [A method for determining the two-pole voltage-current characteristic] Kukushkin V.V., Solyakov V.N., 30.12.1981.

26. USA patent 4456880. *I-V curve tracer employing parametric sampling*. Warner T., Cox C., 26.06.1984.

27. USA patent 4467275. *DC characteristics measuring system*. Koichi Maeda, Haruo Ito, 21.08.1984.

28. *International Rectifier. Application Note AN-957. Measuring HEXFET MOSFET Characteristics*. Available at: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-957.pdf>. (12.10.2011)

29. Iermolenko I. O., Bondarenko O. F. Remote-access computer system for measurement of the current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Proc. of the 14th Int. sc.-pract. conf. «Modern information and electronic technologies»*, Ukraine, Odessa, 2013, vol. I, pp. 113–114 (in Russian)

30. Skvortsov S. [High-performance measurement and power supply units of Keithley Instruments for electronic components and IC testing] *Chip-News*, 2005, no 7, pp. 30–32 (in Russian)

31. Agilent Technologies. *E5260A 8 Slot High speed Measurement Mainframe*. Available at: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1356EN.pdf>. (19.03.2012)

32. Agilent Technologies. *B1530A Waveform Generator Fast Measurement Unit*. Available at: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8378EN.pdf>. (10.09.2011)

33. Davidov P. D. [Analysis and calculation of thermal modes of semiconductor devices] Moscow, Energiya, 1967, 144 p. (in Russian)

34. Chebovskii O. G., Moiseev L. G., Nedoshivin R. P. [Power semiconductor devices. Reference book] Moscow, Energoatomizdat, 1985, 401 p. (in Russian)

35. Tugov N. M., Glebov B. A., Charykov N. A. [Semiconductor devices] Moscow, Energoatomizdat, 1990, 576 p. (in Russian)

36. UA patent 96998 [A method of automated measurement of current-voltage characteristics of semiconductor devices] O. F. Bondarenko, Ye. O. Yermolenko, 2011, bul. no 24.

37. GB patent 2004/034071. *Semiconductor monitoring instrument*. Ladbroke Peter, Goodship Neil, 22.04.2004.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях. — Одесса: Политехперіодика, 2013.

В книге рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электро монтажа с использованием непаяных контактных соединений. Рассматриваемые методы и модели — компьютерно-ориентированные и предполагают широкое использование средств вычислительной техники. Книга предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

