

ПОТРЕБНОСТЬ В БОЛЕЕ МОЩНЫХ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ УЖЕСТОЧАЕТ ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

DEMAND FOR HIGHER POWER SEMI DEVICES WILL REQUIRE PUSHING INSTRUMENTATION TO NEW EXTREMES

Ли Стауффер (Lee Stauffer), Марк Кеджер (Mark Cejer), Keithley Instruments, Inc.

Направления развития контрольно-измерительной аппаратуры последнего поколения определяются совокупностью современных рыночных тенденций. Многие сегменты электронной промышленности, включая производство полупроводниковых приборов, нацелены на повышение эффективности генерации, передачи и потребления электроэнергии. Для создания устройств управления электродвигателями, регуляторов напряжения, преобразователей энергии и другого оборудования традиционно используются кремниевые п/п приборы. Поскольку большинство силовых п/п приборов работает в ключевом режиме, то возникает потребность повысить их экономичность путем уменьшения токов утечки и сопротивления в открытом состоянии.

В то же время полупроводниковые технологии эволюционируют в сторону создания устройств, способных работать при существенно больших напряжениях, токах, мощностях и частотах. Это обещает их изготовителям расширение рынков сбыта, поскольку полупроводниковые устройства все чаще приходят на смену электромеханическим, которые некогда доминировали в сфере преобразования и передачи энергии. Это становится особенно очевидным при сравнении прогнозов их производства с прогнозами объемов производства других дискретных полупроводниковых приборов. Считается, что самым крупным и быстрорастущим сегментом дискретных полупроводниковых приборов станут силовые транзисторы. Этот рост будет стимулироваться приложениями и технологиями, связанными с эффективным использованием энергии.

Спрос на силовые полупроводниковые приборы постоянно растет, порождая



специяльную потребность в контрольно-измерительной аппаратуре, способной измерять существенно большие уровни напряжений и пиковых токов, чем раньше (см. табл. 1). И что еще важнее, тесты на пробой и утечку, обычно выполняемые при напряжении в 2-3 раза больше номинального или рабочего, вызывают потребность в измерительных приборах, способных подавать и измерять все более высокие напряжения. В открытом состоянии п/п приборы должны пропускать десятки и сотни ампер с минимальными потерями. В закрытом состоянии они должны выдерживать тысячи вольт с минимальными токами утечки.

Многие изготовители силовых п/п приборов обращаются к новым материалам, таким как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). По сравнению с кремнием они позволяют создавать более эффективные п/п приборы, обладающие более высокой удельной мощностью, меньшими размерами, лучшими характеристиками при высокой температуре, меньшими токами утечки, более широким диапазоном частот и меньшим сопротивлением в открытом состоянии. В то же время, поскольку устройства на основе SiC и GaN обладают существенно меньшей утечкой по сравнению с кремниевыми, то при измерении их ВАХ наряду с подачей более высоких напряжений возникает потребность в большей чувствительности по току. Поэтому измерение характеристик этих приборов при очень малых токах превращается в серьезную проблему. В большинстве случаев для обе-

спечения достаточной помехоустойчивости при слаботочных измерениях приходится использовать триаксиальные кабели.

С карбидом кремния, нитридом галлия и другими полупроводниковыми соединениями работать труднее, чем с традиционным кремнием, поскольку сложнее контролировать параметры, обусловленные технологическими процессами изготовления прибора. Новые технологии не столь развиты, как кремниевая, что создает серьезные проблемы для инженеров, отвечающих за разработку устройств и измерение их характеристик, а также для специалистов-технологов, занимающихся контролем качества, анализом отказов и контролем технологического процесса. Из-за больших расходов на решение этих проблем и высокой стоимости самых материалов цена новых приборов обычно выше, чем их кремниевых аналогов. Это заставляет производителей снижать расходы на тестирование, особенно на этапе заключительных испытаний, что входит в противоречие с высокими требованиями к надежности, предъявляемыми конечными потребителями.

Главная проблема, стоящая перед производителями силовых полупроводниковых приборов, состоит в том, что они должны быстро и с минимальными затратами разрабатывать и выпускать устройства, работающие с большей мощностью и меньшими утечками. И здесь возникает острая потребность в новом подходе к контрольно-измерительной аппаратуре. Когда силовые полупроводниковые приборы изготавливались только из кремния, требования к диапазонам измерений были не такими серьезными, как сейчас. Относительно небольшие темпы изменения ассорти-

Таблица 1

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

	Высококачественные источники питания, серверы и т.п.	ИБП	Гибридные и электрические автомобили	Инверторы солнечных батарей	Ветрогенераторы	Промышленные электродвигатели	Электропривод, ж/д тяговые системы, пропульсивные системы
П/п приборы	ПТ, диоды	ПТ, БТИЗ, диоды	ПТ, БТИЗ, диоды	ПТ, БТИЗ, диоды	БТИЗ, диоды	ПТ, БТИЗ, диоды	БТИЗ, диоды
Ном. напряжение	600 В	600 - 1200 В	650 - 2000 В	600 - 1200 В	Сейчас: 690 В, будущим: 3 - 4 кВ	600 - 1200 В	>5 кВ
Макс. ток	0,5 - 10 А	2 - 100 А	50 - 200 А	75 А	>150 А	3 - 100 А	>200 А

мента силовых п/п приборов позволяли в течение многих лет использовать для их тестирования одну и ту же номенклатуру измерительного оборудования. Поэтому производители контрольно-измерительного оборудования не имели серьезных стимулов к инновационным изменениям и разработке новых решений, обладающих большими возможностями. Изготовители некоторых испытательных систем позволяли им устаревать до тех пор, пока они не становились полностью нерентабельными из-за резкого падения спроса, роста стоимости поддержки и снижения прибыльности.

И хотя на рынке появился ряд новых анализаторов, обслуживающих нишевые приложения (например, параметрические измерения в научных исследованиях), их цены и окупаемость зачастую неприемлемы для обычных покупателей. Кроме того, они не отвечают более широким требованиям производственного тестирования, контроля качества и анализа отказов. Аналогичным образом, интегрированные системы, способные выдавать высокую мощность и измерять малые токи, весьма сложны в техническом отношении. Разработка и поддержка таких специализированных систем обычно требует привлечения большого

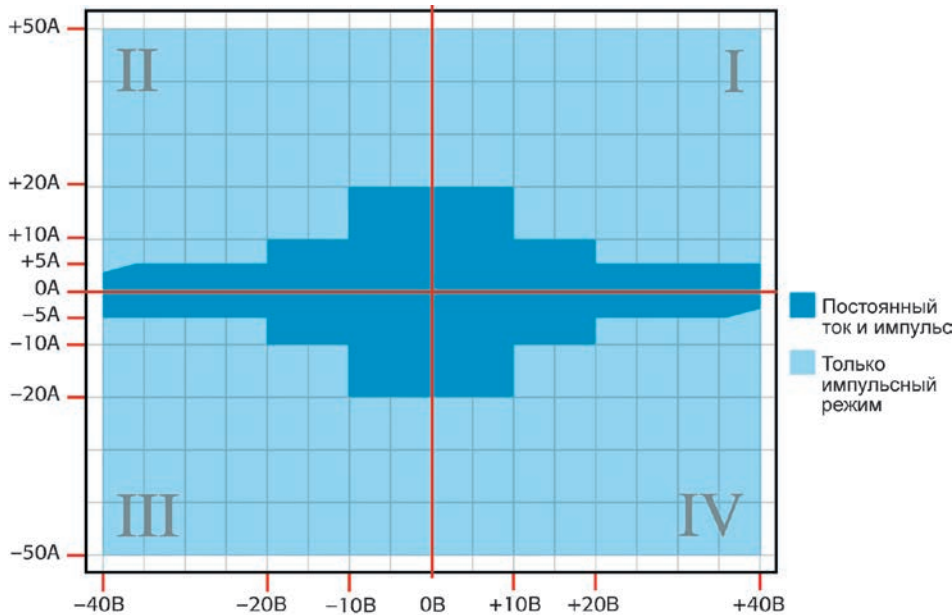


Рис. 1. Модель 2651A обладает самым широким в отрасли диапазоном тока с импульсной мощностью 2000 Вт (40 В при 50 А) и долговременной мощностью постоянного тока 200 Вт

Но наблюдаемая во всем мире тенденция к более эффективному использованию энергии и «зеленых» технологий стала новым стимулом развития силовых п/п приборов. Волна инноваций поднялась еще выше, когда производители, как им казалось, дошли до предельных показателей эффективности своей продукции, независимо от материала, будь то кремний, карбид кремния или нитрид галлия.

Когда после многих лет застоя снова начался рост, то производители силовых п/п приборов поняли, что используемое ими контрольно-измерительное оборудование не может удовлетворить современные требования. Старая аппаратура просто неспособна измерять малые токи и не обладает точностью, необходимой для снятия характеристик приборов и материалов нового поколения. Кроме того, во многих случаях выходная мощность недостаточна для параметрических измерений современных устройств. В результате производители контрольно-измерительного оборудования вынуждены реагировать на возросшие требования, но многие традиционные поставщики просто не успевают им следовать.

числа специалистов, в силу чего они рентабельны, только когда используются для производственного тестирования. Традиционные характеристики, хотя и пригодны для некоторых для исследовательских приложений или контроля качества, требующих подачи меньшей мощности, неспособны измерять малые токи и доступны сейчас только на рынке подержанного оборудования. Но и более новые модели все еще неспособны измерять достаточно малые токи, а их точность, мощность и цена не привлекают современных производителей силовой электроники. И хотя серийно выпускаемые системы автоматизированного тестирования всегда использовались для производственных испытаний силовых полупроводниковых приборов, их стоимость, размер и неспособность измерять некоторые параметры и малые токи делают их не совсем подходящими для научных исследований, контроля качества и анализа отказов. Являясь «одноквadrантными» устройствами, источники питания не могут потреблять ток — им нужно несколько секунд для разряда конденсатора, что замедляет процесс тестирования и создает серьезные проблемы в производственных приложениях.

Другим важным вопросом является безопасность при работе с высоковольтными испытательными системами, которые требуют применения защитных блокировок, двойных контуров заземления и других средств, защищающих операторов и чувствительное системное оборудование. В частности, в Европе очень важно обеспечить соответствие стандартам безопасности, например МЭК 60601.

В свете описанных недостатков изготовители контрольно-измерительного оборудования вынуждены искать новые подходы к тестированию силовых полупроводниковых приборов и материалов. В результате многие поставщики, включая компанию Keithley Instruments, начали применять источники-измерители (SMU), способные подавать питание и выполнять измерения. Источник-измеритель представляет собой объединенные в одном корпусе быстро перестраиваемые источники тока и напряжения, а также измерительные приборы с широкими возможностями. На ранних этапах основным недостатком этих приборов был ограниченный диапазон рабочих характеристик — первые источники-измерители просто не могли выдавать мощность, необходимую для точного измерения силовых полупроводниковых приборов. В качестве первого шага на пути к устранению этих ограничений компания Keithley представила в 2011 г. источник-измеритель повышенной мощности SourceMeter® модели 2651A, специально разработанный для измерения больших токов силовых электронных устройств.

Подобно всем источникам-измерителям Keithley серии 2600A, модель 2651A объединяет возможности параметрического анализатора полупроводниковых приборов, прецизионного 4-квadrантного источника напряжения и тока, цифрового мультиметра, низкочастотного генератора сигналов произвольной формы, импульсного генератора, электронной нагрузки и контроллера синхронизации — и все это в одном приборе шириной 19 дюймов и высотой 2U (89 мм). Кроме того, этот источник-измеритель обладает самым широким в отрасли диапазоном тока, позволяя подавать импульсы мощ-



Рис. 2. Источник-измеритель SourceMeter® 2651A предназначен для подачи больших токов/напряжений и измерения характеристик силовых полупроводниковых приборов

ностью 2000 Вт (40 В при 50 А) и непрерывный сигнал постоянного тока мощностью 200 Вт (рис. 1). Он может выдавать и измерять токи от 1 пА до 50 А, а максимальный импульсный ток можно увеличить до 100 А, соединив между собой два прибора.

Хотя модель 2651А может использоваться во многих приложениях для тестирования силовых п/п приборов, мы на этом не остановились. В ответ на потребность в тестировании п/п приборов и материалов при высоком напряжении, компания Keithley разработала источник-измеритель, оптимизированный для устройств, требующих подачи высокого напряжения, быстрой перестройки и точного измерения тока и напряжения. SourceMeter® модели 2657А (рис. 2) предназначен для разработчиков и изготовителей силовых полупроводниковых приборов, а также для исследователей, работающих с такими приборами и материалами, в аэрокосмической и оборонной, автомобильной и медицинской промышленности. Обе модели — 2651А и 2657А — отвечают требованиям многих современных приложений и могут использоваться различными подразделениями одной организации. Это предоставляет дополнительную возможность сопоставления результатов, полученных на разных этапах отладки производственного процесса, что помогает ускорить решение проблем и сократить время продвижения на рынок.

Обладая способностью выдавать до 180 Вт постоянного или импульсного тока, модель 2657А предлагает самую большую в отрасли мощность при высоких напряжениях (3000 В). Столь широкий диапазон позволяет выполнять параметрические измерения, недоступные конкурирующим системам. Источники-измерители других производителей при напряжении 3 кВ могут выдавать всего 12 Вт мощности. Кроме того, модель 2657А отличается высокой частотой генерируемых высоковольтных импульсов. Импульсы напряжением 3000 В имеют период следования менее чем 15 мс, а импульсы напряжением 500 В — менее чем 2 мс (рис. 3).

Благодаря двум встроенным быстродействующим прецизионным АЦП, делающим одну выборку за 1 мкс, модель 2657А позволяет точно измерять переходные процессы и устойчивые состояния, включая быстротекущие температурные эффекты. Разрешение в один фемтоампер позволяет измерять очень малые токи утечки, характерные для п/п приборов следующего поколения.

Виртуальная соединительная панель TSP-Link® модели 2657А позволяет легко формировать быстродействующие и масштабируемые интегрированные системы, объединяющие до 32 узлов. Это дает возможность создавать мощные многоканальные системы тестирования силовых п/п приборов, сопоставимые по скорости

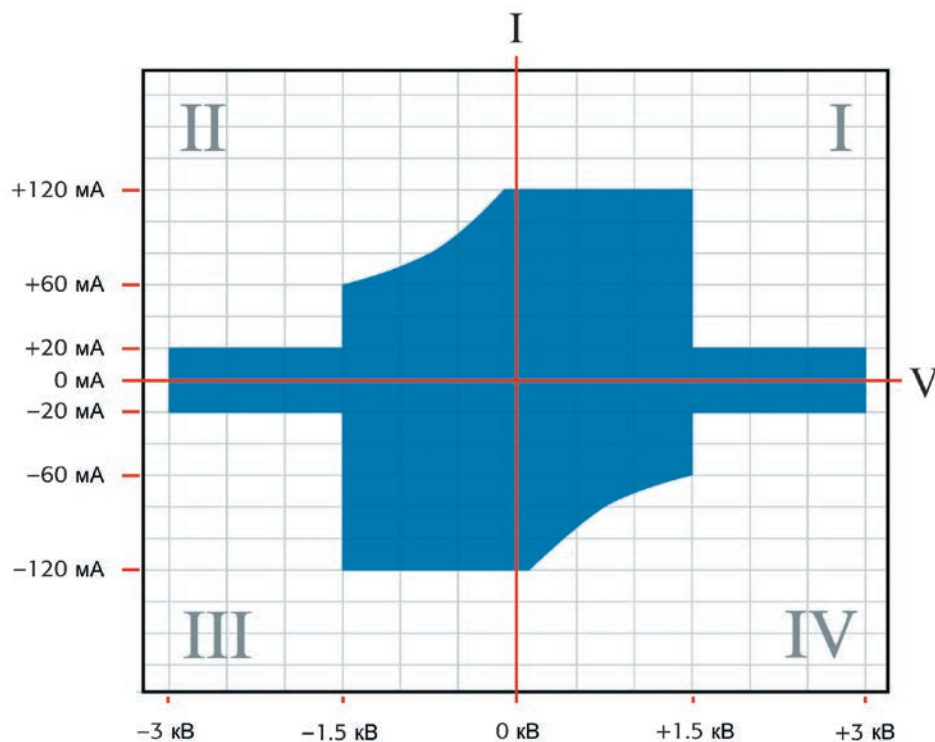


Рис. 3. Модель 2657А предлагает самую высокую в отрасли мощность (до 180 Вт непрерывной или импульсной мощности) при напряжениях до 3000 В

с крупными автоматизированными испытательными системами, которые стоят на десятки тысяч долларов дороже. Встроенный контроллер синхронизации обеспечивает точную привязку по времени (500 нс) и строгую синхронизацию каналов нескольких приборов.

Опциональная тестовая оснастка для силовых устройств, предназначенная для стендовых и научно-исследовательских приложений, позволяет подключать мощные корпусированные п/п приборы с рабочим напряжением до 3000 В и током до 100 А, упрощая и делая более безопасной настройку испытательных систем, состоящих из источников-измерителей большой и малой мощности. Модель 2657А может применяться в сочетании с другими источниками-измерителями серий 2600А и 4200-SCS для поддержки многоканального тестирования. Опциональные защитные и соединительные модули упрощают безопасное подключение нескольких измерительных приборов к зондовой станции, устройству управления или специализированной тестовой оснастке. Уникальный порт на задней панели позволяет подключать к тестируемому устройству осциллограф или датчик температуры.

TSP® Express — ПО для снятия ВАХ через интерфейс LXI — поддерживает измерение основных характеристик силовых п/п приборов, позволяя обойтись без установки программного обеспечения и программирования источника-измерителя. Пользователи могут просто подключить ПК к сетевому порту LXI источника-измерителя, а затем войти в TSP® Express из любого браузера, под-

держивающего Java. В качестве опции имеется ПО ACS Basic Edition для измерения параметров компонентов. Библиотеки измерений охватывают широкую номенклатуру п/п приборов (полевые и биполярные транзисторы, диоды, БТИЗ и т.д.) и включают многочисленные тесты (измерение входных, выходных и передаточных характеристик большинства устройств).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя никто точно не знает, как именно будут выглядеть силовые полупроводниковые приборы нового поколения, абсолютно точно можно сказать, что для их тестирования и измерения параметров потребуется измерительное оборудование с широким динамическим диапазоном и возможностью измерения исключительно малых токов утечки. По мере развития силовой электроники производители измерительного оборудования будут продолжать улучшать его характеристики с целью достижения оптимального сочетания мощности, производительности и стоимости. 📧

Although no one can know exactly what the next generation of power semiconductor devices will look like, it's absolutely certain they will require instrumentation with a broad dynamic range and exceptional low-level leakage measurement capabilities to characterize and test them. As new devices evolve, their manufacturers will continue to explore their options, seeking the best combination of power, performance, and cost-effectiveness available.