

Измерение теплового сопротивления СВЧ-транзисторов

Владимир Вяхирев, Михаил Духновский, Юрий Федоров,
Виктор Пчелин, Вячеслав Трегубов (Москва)

В статье описано практическое применение измерителя-анализатора вольтамперных характеристик Л2-108 для измерения импульсного теплового сопротивления СВЧ-транзисторов. Отмечены особенности выбора термочувствительного параметра. Показано преимущество транзисторов на основе GaN с подложкой SiC по сравнению с транзисторами на основе GaAs с точки зрения отвода тепла от кристалла.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием СВЧ-приборов, изготовленных из перспективных широкозонных полупроводниковых материалов GaN, SiC, алмаза и гетероструктур на их основе, становится актуальной задача контроля их теплового сопротивления (ТС). Широко распространённый арсенид галлия GaAs обладает сравнительно низкой теплопроводностью, поэтому ТС приборов на его основе не нуждается в постоянном контроле, так как определяется, в основном, толщиной самого кристалла, и в меньшей степени – расположением тепловыделяющих участков и их размерами.

Значение ТС зависит от физических свойств полупроводниковых материалов или гетероструктур, переходных слоёв, технологии и качества пайки

или склеивания. Применение широкозонных материалов позволяет изготавливать СВЧ-приборы большей мощности за счёт увеличения напряжения питания. В то же время хорошая теплопроводность этих материалов позволяет значительно снизить ТС. При этом возникает необходимость технологического контроля ТС, поскольку определяющими факторами отвода тепла становятся технологии изготовления и сборки приборов.

Различают импульсное и статическое ТС. Импульсное ТС зависит от времени, в течение которого прибор рассеивает мощность, – от так называемой длительности импульса нагрева (ДИН). Связано это с тем, что в распределении тепла участвуют не только тепловые сопротивления, но и теплоёмкости час-

тей кристалла, кристалла в целом и окружающих его тел. При малых ДИН определяющими факторами являются теплопроводность материалов, непосредственно прилегающих к тепловыделяющим участкам. При больших длительностях импульса нагрева превалируют свойства теплоотвода (размеры, обдув воздухом и т.п.). По мере увеличения ДИН свой вклад в тепловое сопротивление поочередно добавляют все тела и границы раздела, расположенные между тепловыделяющим участком прибора и теплоотводом. В пределе, при непрерывной мощности, ТС стремится к своему максимальному, т.н. статическому значению.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В настоящей статье описано измерение импульсного теплового сопротивления СВЧ-полевых транзисторов с барьером Шоттки на установке, разработанной на базе измерителя-анализатора вольтамперных характеристик Л2-108 [1, 2].

В дополнение к Л2-108, разработан коммутатор и специализированное программное обеспечение (ПО) для измерения ТС двумя способами в соответствии с [3]. Суть обоих способов заключается в косвенном измерении ТС по анализу релаксации термочувствительного параметра (ТЧП) после воздействия импульса нагрева известной мощности и длительности. В первом способе в качестве ТЧП выступает падение напряжения на барьере Шоттки при пропускании через него прямого тока, во втором – омическое сопротивление канала транзистора. Стадии нагрева и стадии измерения величины ТЧП обеспечивались ресурсами прибора Л2-108, коммутатор переключал измеряемый прибор из режима нагрева в режим измерения.

Согласно [3], измерению ТС предшествует измерение температурной зависимости величины ТЧП для каждого испытуемого прибора или для партии однотипных приборов. Поэтому был разработан автоматизированный термостат и соответствующее ПО,

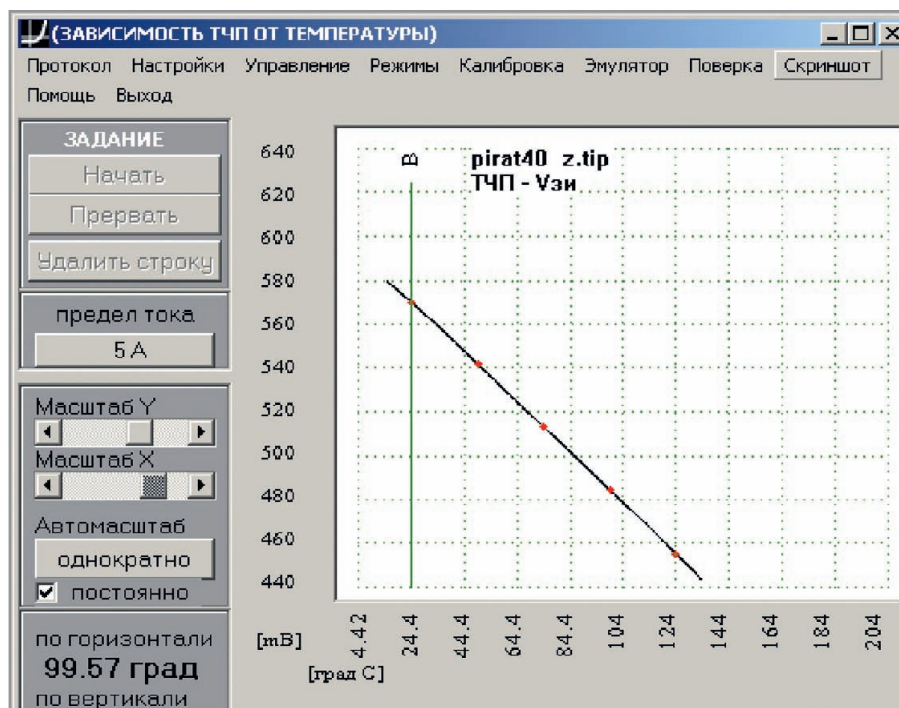


Рис. 1. Типовая зависимость ТЧП (падение напряжения на затворе) от температуры для первого способа измерения ТС

позволяющие производить автоматическое измерение температурной зависимости ТЧП.

Процесс измерения происходил следующим образом. Исследуемый прибор в измерительной ячейке подключался к Л2-108, а температура ячейки устанавливалась с помощью термостата. В диапазоне от комнатной температуры до 120°C автоматически измерялись значения ТЧП. Этот этап занимал от 4 до 6 мин. Результат в виде полинома сохранялся в файле, соответствующем данному типу приборов. Программа визуализировала эту зависимость, чтобы оценить корректность измерений и сравнить с зависимостями других приборов (см. рисунки 1 и 2).

Затем прибор Л2-108 переводился в штатный режим импульсного измерителя ВАХ для установки параметров стадии нагрева. Наблюдая ВАХ, можно было убедиться в исправности исследуемого прибора и, что особенно актуально, в отсутствии паразитной генерации (см. рис. 3). Кроме зависимости тока стока от напряжения стока, прибор Л2-108 показывал напряжение затвор – исток (первое число справа от края каждой линии) и ток через затвор (второе число справа от края каждой линии). Эти числа соответствуют крайней правой точке ВАХ, т.е. моменту развёртки, когда напряжение стока максимально. Этой же точке соответствует и режим, который программа установит при измерении ТС на стадии нагрева.

После получения команды на измерение ТС, система устанавливала задержку по времени, необходимую для уменьшения температурных градиентов, которые могли возникнуть в измеряемом приборе при наблюдении ВАХ. В том случае, если предварительного просмотра ВАХ не производилось, задержка перед измерением ТС была меньше. После измерения ТС программа отображала постоянную величину ТЧП до импульса нагрева, её релаксацию после импульса, а также результаты расчёта ТС (см. рис. 4).

На рисунке 5 представлены результаты измерений в виде зависимости ТС от ДИН. После соответствующей математической обработки такой зависимости можно получить полную информацию о тепловых сопротивлениях и теплоёмкостях всех слоёв прибора, участвующих в отводе тепла [4–6]. Здесь мы ограничимся качественными пояснениями.

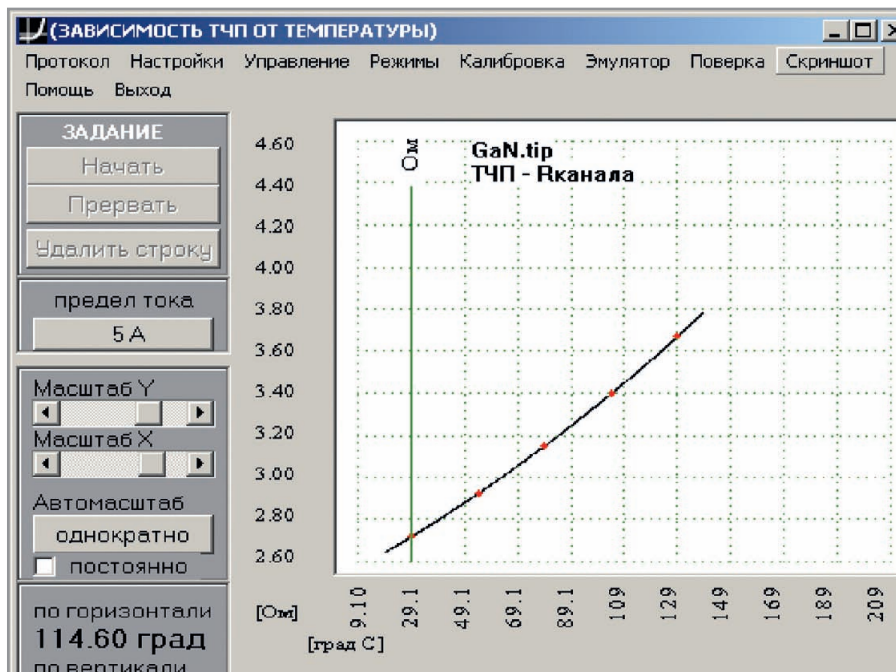


Рис. 2. Типовая зависимость ТЧП (сопротивление канала транзистора) от температуры для второго способа измерения ТС

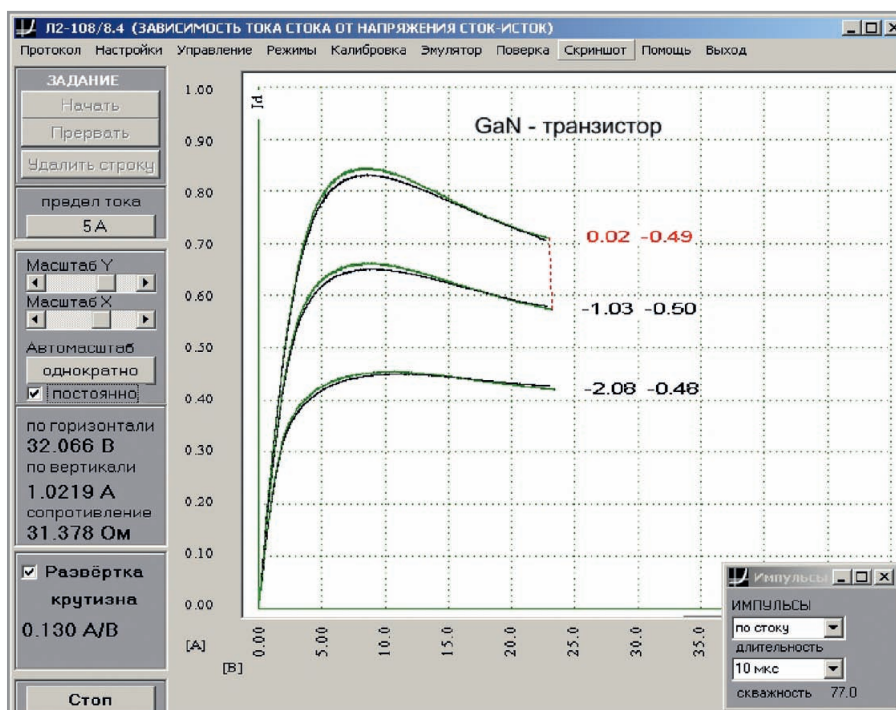


Рис. 3. Пример семейства импульсных ВАХ.

Измерение происходило при большой скважности импульсов напряжения стока, чтобы исключить заметный разогрев

Линии 3 и 4 соответствуют транзисторам на основе GaAs. Разница их ТС объясняется примерно трёхкратным отличием в площади кристалла. Оба транзистора находились на кристаллодержателе, который устанавливался в измерительную ячейку. Значительное повышение ТС при увеличении ДИН свыше 200 мс объясняется тем, что теплоёмкость кристаллодержателя слишком мала, чтобы участвовать в поглощении тепла в течение этого времени.

Линии 1, 2 соответствуют однотипным транзисторам на основе GaN при одинаковой мощности импульса нагрева (2,5 Вт). Транзистор № 2 припаян золото-оловянным припоем к кристаллодержателю, аналогично транзисторам GaAs, а транзистор № 1 приклеен электропроводящим клеем к массивному теплоотводу. Для транзистора № 2 тепловой контакт кристалла с кристаллодержателем получился гораздо лучше, что обеспечило преимущество

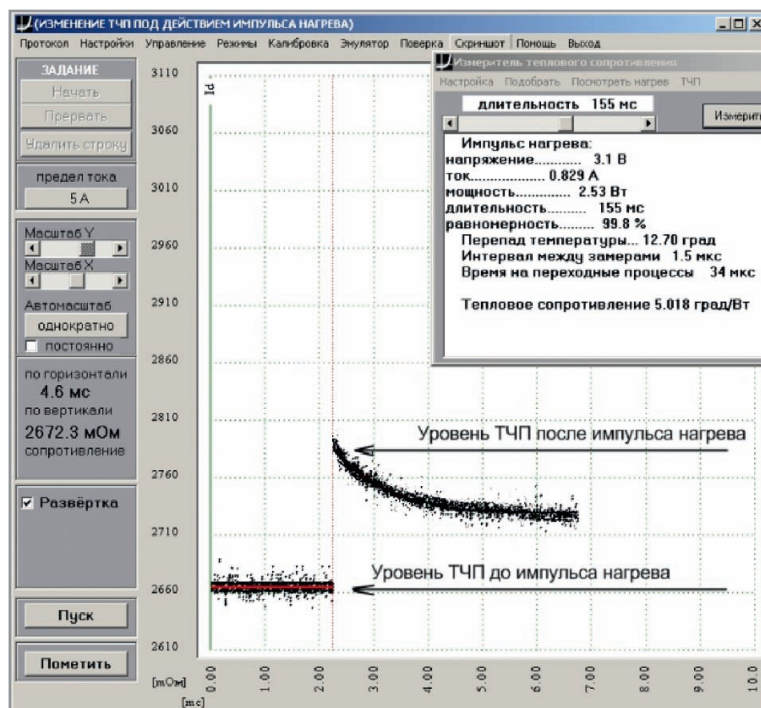


Рис. 4. Пример представления результатов измерения ТС

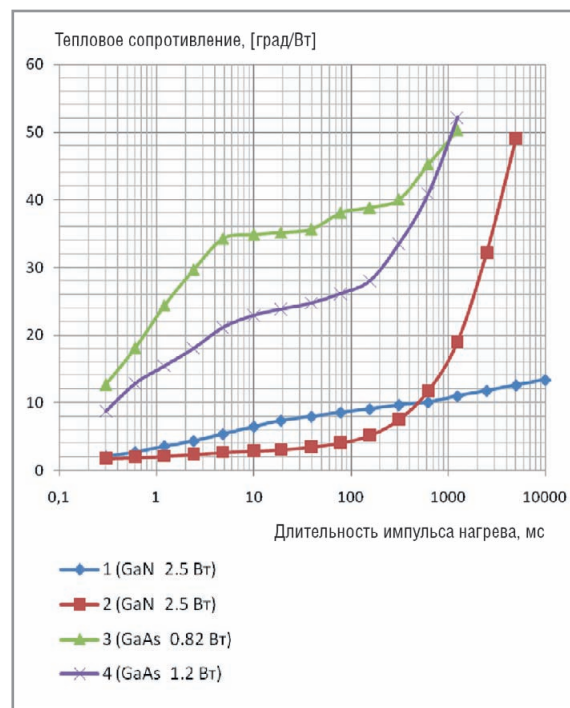


Рис. 5. Зависимости ТС от ДИН

этой конструкции в диапазоне ДИН от 0,5 до 500 мс. По той же причине, как и для транзисторов GaAs, при ДИН более 200 мс наблюдался рост ТС. Транзистор № 1 при малых ДИН имел большее ТС из-за низкой теплопроводности клеевого соединения по сравнению с припоем. При больших ДИН он заметно выигрывал благодаря большой теплоёмкости массивного теплоотвода.

Тепловое сопротивление обоих транзисторов на основе GaAs было измерено первым способом, при котором ТЧП является падением напряжения на прямосмещённом затворе, однако попытка измерить тем же способом ТС тран-

зисторов GaN привела к совершенно неправдоподобным результатам. При уменьшении ДИН тепловое сопротивление не снижалось, а иногда даже росло. Такое поведение можно объяснить наличием в материале электрически активных дефектов (ЭАД), создающих глубокие уровни в запрещённой зоне. Поскольку при переходе от режима нагрева к режиму измерения ТЧП потенциал затвора сильно изменялся, медленная перезарядка ЭАД, находящихся вблизи барьера Шоттки, заметно влияла на процесс релаксации.

Измерение ТС транзисторов GaN вторым способом было более успеш-

ным, так как здесь потенциал затвора устанавливался неизменным в течение всего процесса измерения, а сопротивление канала измерялось вдали от области насыщения, т.е. при незначительном влиянии затвора.

О наличии ЭАД в области барьера Шоттки можно судить и по семейству импульсных ВАХ, полученных с помощью прибора Л2-108. Например, на рисунке 6 видно взаимное влияние линий ВАХ друг на друга. Кажется, что потенциал затвора переключается с некоторой задержкой и его значение заметно отличается от равновесного. На рисунке 7 приведены две линии ВАХ, измеренные при одинаковых напряжениях на стоке и затворе, но при различных способах управления импульсами тока стока. Видно, что при управлении по затвору модуляция канала происходит с опозданием, т.е. за время импульса ЭАД не успевают изменить заряд и препятствуют отпираанию канала. Это приводит к снижению тока стока.

Следует отметить, что подобное поведение ВАХ демонстрировали транзисторы на основе GaN, имеющиеся в нашем распоряжении. Необходимо иметь в виду, что влияние ЭАД в других приборах может быть совершенно иным, поэтому для каждого типа приборов необходимо подбирать свои способы и режимы измерения ТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значение теплового сопротивления транзисторов, измеренное при различ-

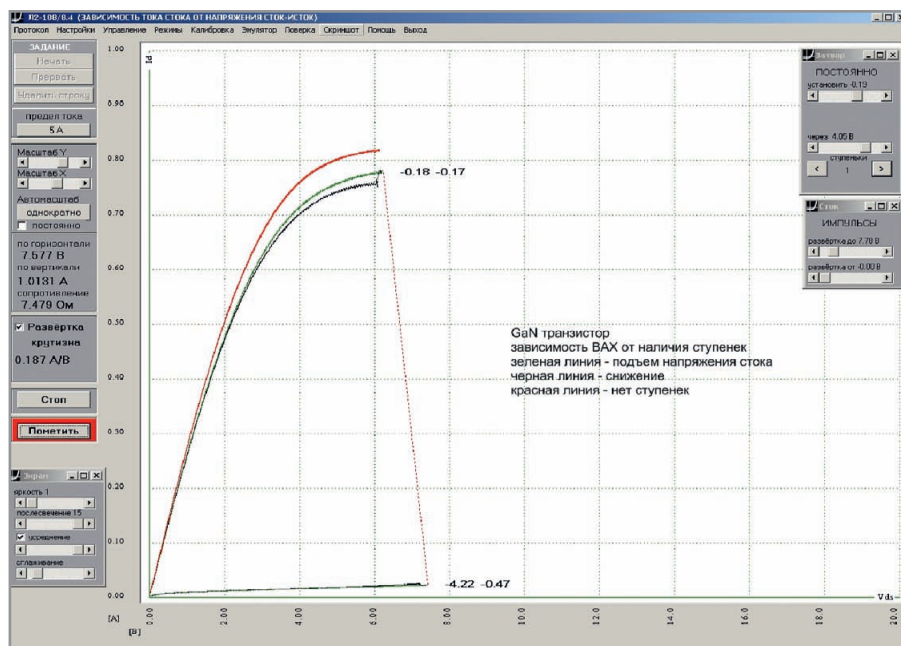


Рис. 6. Взаимное влияние линий ВАХ транзистора на основе GaN из-за наличия ЭАД

ных ДИН, характеризует не только качество прибора, но и технологию его монтажа в корпус.

Использование мощных транзисторов на основе GaN с теплопроводящей подложкой, тепловое сопротивление которых значительно ниже, чем у приборов на основе GaAs, предъявляет повышенные требования не только к качеству монтажа кристаллов транзистора в корпус, но и к материалам и конструкции самого корпуса.

Измеритель-анализатор Л2-108 с набором дополнительных опций позволяет оперативно контролировать тепловое сопротивление транзисторов и интерпретировать полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Госстандарт РФ. Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству RU.C.34.083.A № 42329 об утверждении типа средств измерений.
2. Измеритель-анализатор автоматизированный импульсных статических вольт-амперных характеристик полевых СВЧ-транзисторов Л2-108. Руководство по эксплуатации 6687-008-63533393-2010 РЭ.
3. ОСТ 11 0944 - 96.

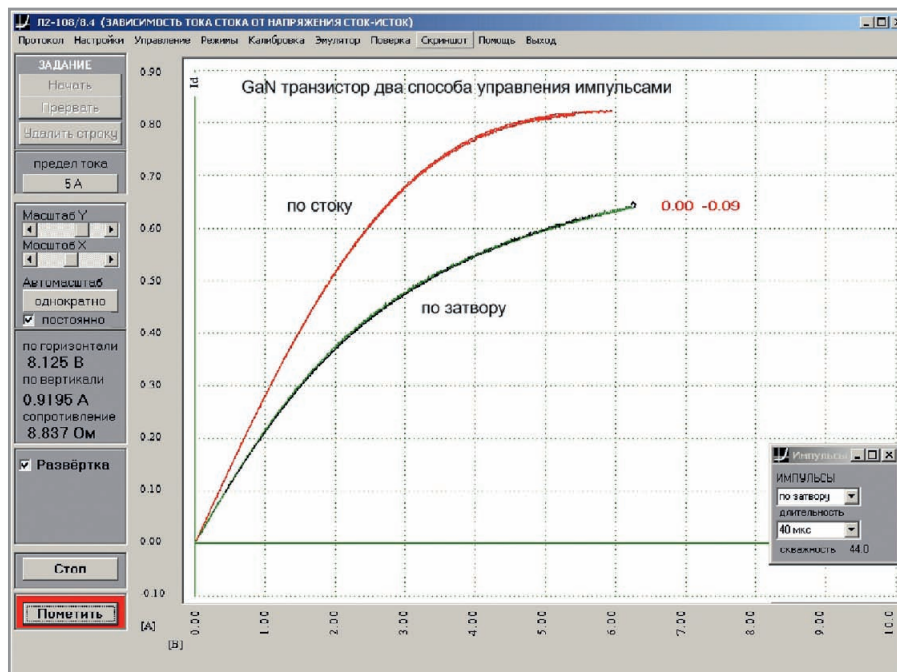


Рис. 7. Два способа управления импульсами тока стока транзистора на основе GaN

4. Szekegy V. On the representation of infinite-length distributed RC one-ports. IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1991. Vol. 38. PP. 711-719.
5. Rencz M., Szekegy V. Determining partial thermal resistances in a heat flow path with the help of transient measurements. Proc. of the

7 THERMINIC Workshop, 27-27 Sept. 2001. Paris. PP. 250-256.

6. Poppe A. Measurement, modeling and simulation of thermal dynamics in microelectronic structures. Technical report, REASON Tutorial «Half-day on Thermal Issues in Microelectronics». <http://reason.imio.pw.edu.pl>. 2003. ©

ООО «Системы Компьютерного Контроля и Диагностики» cc_d@mail.ru.

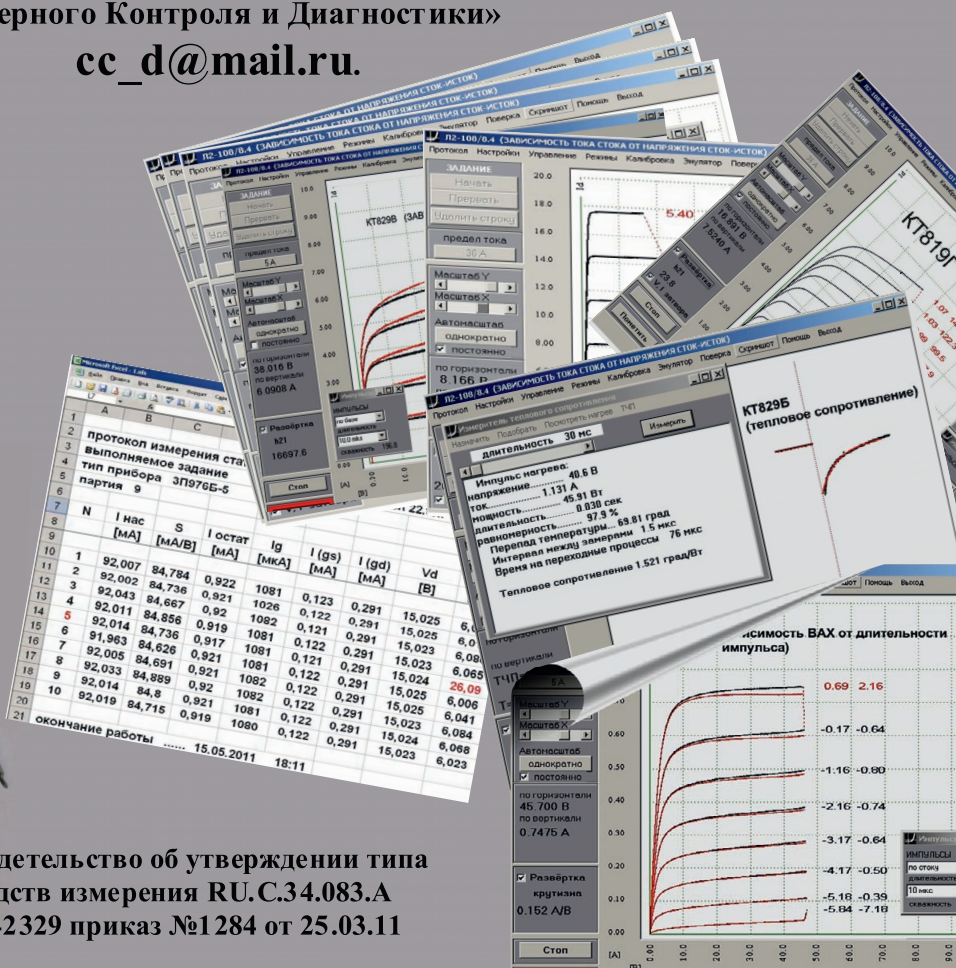


Л2-108

- ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.
- ТЕПЛОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.
- ПРОТОКОЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.



Реклама



свидетельство об утверждении типа
средств измерения RU.C.34.083.A
№ 42329 приказ №1284 от 25.03.11