

АКУСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

ДЖИМ УИЛЬЯМС (JIM WILLIAMS), научный сотрудник, Linear Technology
ОМАР САНЧЕС-ФИЛИП (OMAR SANCHEZ-FELIPE), программист, Linear Technology

В статье рассматривается применение ультразвуковых датчиков для измерения температуры воздуха в банке из-под оливок.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая термометрия является не до конца изученным и элегантным методом, позволяющим измерять температуру по времени прохождения звука в среде [1—4]. При анализе этого метода измерений следует принять во внимание следующие особенности:

- акустические термометры функционируют в условиях, непригодных для работы традиционных датчиков;
- температура воздуха измеряется по скорости звука;
- атмосферное давление не является значимой переменной;
- необходимо очень внимательно проектировать измерительный тракт;
- для уменьшения влияния шума и паразитных сигналов может использоваться стробирование сигналов;
- микропроцессор обеспечивает калибровку системы с разрешением 1°F.

Среда может быть твердой, жидкой или газообразной. Акустические термометры работают практически в любой окружающей среде, включая экстремальные температуры, механические перегрузки, в ядерных реакторах, т.е. в условиях, неприемлемых для работы традиционных датчиков. Установлено, что скорость звука в воздухе пропорциональна квадратному корню из температуры. Время прохождения звукового сигнала через газовый термометр практически не зависит от давления и влажности. Газовые акустические термометры отличаются быстротой реакции на изменение температуры. Они являются практически безынерционными устройствами.

В измерениях принимает участие весь корпус акустического термометра. Полученные данные соответствуют

времени прохождения звукового сигнала по всему измерительному тракту. Традиционные датчики, наоборот, проводят измерения в одной точке. Таким образом, акустический термометр не реагирует на изменения температуры в отдельных точках измерительного тракта. Он аппроксимирует среднюю температуру по всему тракту по задержке звукового сигнала, полученной в ходе изотермических и неизотермических измерений.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Демонстрацию принципа действия акустического термометра начнем с выбора звукового датчика и измерительного тракта со стабильными размерами. Широкополосные ультразвуковые датчики характеризуются хорошим быстродействием, высокой точностью передачи звуковых сигналов, низким джиттером, отсутствием резонансных и других паразитных потерь. Электростатический ультразвуковой датчик (см. рис. 1) обладает всеми перечисленными свойствами [5].

Ультразвуковой датчик в этой системе работает как приемник и передатчик. Устройство жестко монтируется на металлической крышке стеклянного корпуса. Это соединение должно быть прочным, чтобы обеспечить стабильность измерительного тракта по размерам. В рассматриваемом примере используется металлическая крышка и стеклянная банка. Атмосферное давление практически не оказывает какого-либо влияния на измерение времени прохождения сигнала.

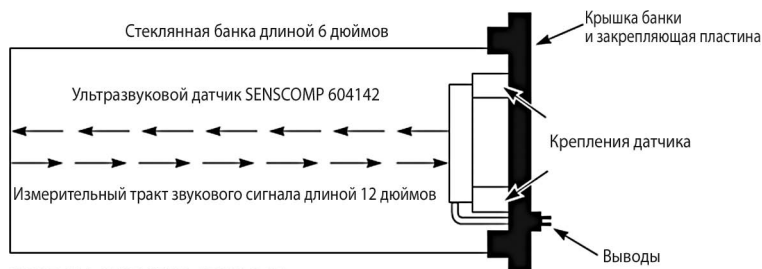
Поместим пустую банку в печь с температурой 100°C. Выводы дат-

чика проходят через крышку через специальный коаксиальный разъем. Стеклянный корпус характеризуется сравнительно низким коэффициентом теплового расширения. Эта конструкция обеспечивает устойчивость длины измерительного тракта к изменениям температуры, давления, а также к механическим воздействиям. Длина пути сигнала (прямого и отраженного) составляет около 12 дюймов. Скорость звука в воздухе равна 1,1 фут/мс (1 фут = 0,305 м).

Таким образом, время прохождения звука до дна банки и обратно составляет 900 мкс. При 75°F изменение времени прохождения звуковым сигналом пути, длина которого не зависит от температуры, составляет 1 мкс/°F. Для разрешения 0,1°F разбросы механических и электрических параметров не должны приводить к временным ошибкам, большим 100 нс, что, в свою очередь, определяет требования к стабильности размеров измерительного тракта, которая при длине пути 12 дюймов должна составлять 0,001 дюйм. Проанализировав все источники погрешностей, можно убедиться в реалистичности требования обеспечить такую стабильность.

При подаче напряжения смещения 150 В на датчик он ведет себя как конденсатор (см. рис. 2). Стартовый импульс тактирующего устройства запускает датчик, который посылает короткий импульсный звуковой сигнал в измерительный тракт. Тактирующее устройство одновременно с этим устанавливает мультивибратор, отвечающий за ширину выходного импульса, в высокое состояние. Ультразвуковой импульс отражается от дна банки, возвращается и воздействует на датчик, что приводит к возникновению очень небольшого механического смещения. Это, в свою очередь, изменяет емкость датчика. В соответствии с уравнением $Q = C \cdot V$, где Q — заряд, C — емкость, V — напряжение, изменение емкости ведет к изменению напряжения на входе усилителя приемника.

Компаратор преобразует изменение выходного сигнала усилителя в соответствующий логический сигнал, сбрасывающий мультивибратор, который



NOTE: ALL CAP VIEWS ARE X-RAY.

Рис. 1. Схема ультразвукового датчика

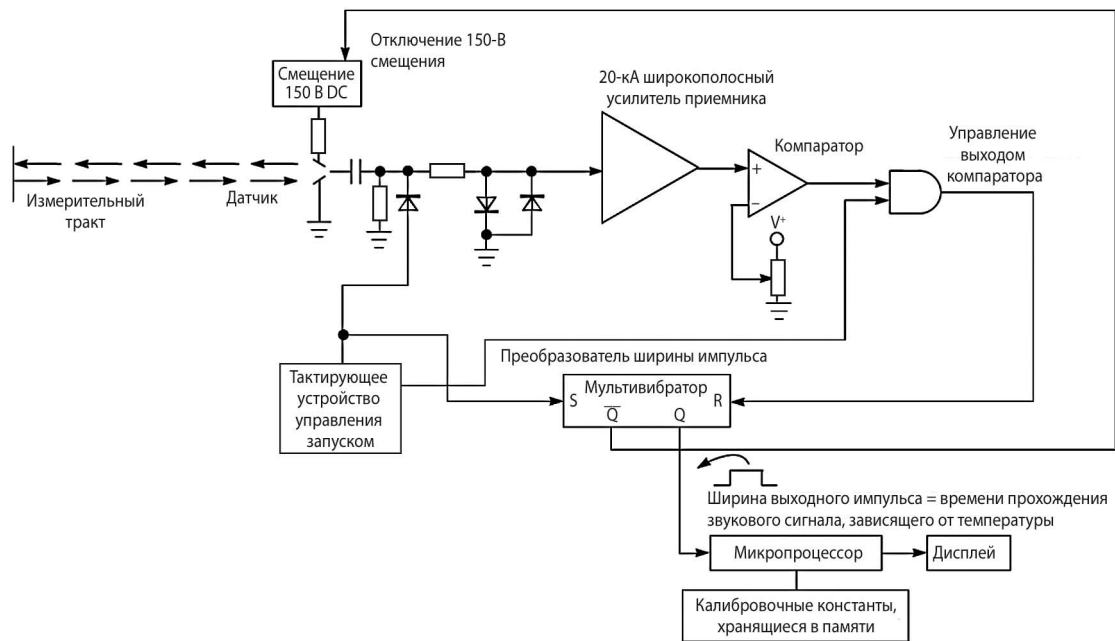


Рис. 2. Схемная реализация акустического термометра

отвечает за формирование импульса определенной ширины. Ширина выходного импульса мультивибратора определяется временем прохождения звуковым сигналом измерительного тракта, зависящим от температуры. В программу микропроцессора заложены калибровочные константы, определяющие зависимость времени задержки сигнала и температуру измерительного тракта. Микропроцессор использует их для расчета температуры по ширине импульса и отображает полученную информацию на дисплее.

Использование второго выхода тактирующего устройства, отключающего выход компаратора на большую часть цикла измерения, позволяет пропускать сигнал компаратора только в то время, когда ожидается возвращение звукового импульса. Это позволяет устранить ложные срабатывания системы на звуковые события, происходящие вне измерительного тракта. Амплитуда поступившего на усилитель сигнала составляет менее 2 мВ. Широкополосный усилитель приемника, работающий в режиме больших коэффициентов усиления, уязвим для паразитных входных сигналов, поэтому на время проведения измерений необходимо отключать 150-В источник напряжения смещения, чтобы исключить влияние всплесков при переключении, способных вывести усилитель из строя. Второй сигнал стробирования снимается с мультивибратора, формирующего выходной импульс определенной ширины. Этот сигнал и отключает на время измерения 150-В источник напряжения смещения.

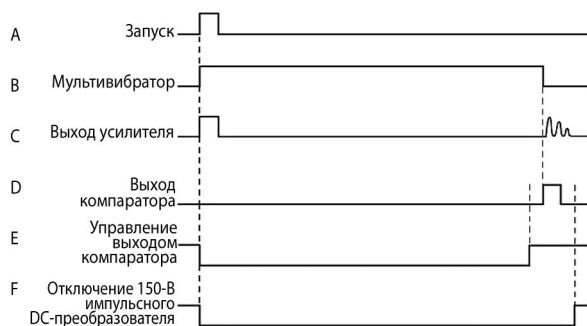


Рис. 3. Принцип работы акустического термометра

Цикл измерения начинается со стартового импульса, запускающего датчик (см. диаграмму А на рисунке 3) и переводящего выход мультивибратора в высокое состояние (диаграмма В). Как только звуковой импульс возвращается в приемник, запускается усилитель (диаграмма С), компаратор меняет свое состояние на противоположное, что вызывает сброс мультивибратора (диаграмма D). Сигналы стробирования защищают компаратор от срабатывания на посторонние звуковые события и на ложные стартовые импульсы, а также отключают высоковольтный регулятор на время измерений (диаграммы Е и F).

ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ СХЕМА

Кварцевый генератор формирует тактовые импульсы частотой 100 Гц (см. рис. 4). Одновибратор ICA подает импульс длительностью 10 мкс на драйвер, состоящий из ключей Q1

и Q2. Через емкостную связь стартовый импульс с выхода драйвера передается в ультразвуковой датчик (см. диаграмму А на рисунке 5). Тот же одновибратор одновременно с этим переводит выходы мультивибратора в высокое состояние. Высокий уровень выходного сигнала мультивибратора отключает высоковольтный импульсный регулятор на время измерений. Второй одновибратор (ICB) генерирует еще один импульс, отключающий выход микросхемы компаратора IC1 на время несколько меньшее, чем прогнозируемое время возвращения звукового импульса (диаграмма В).

Звуковой сигнал проходит весь измерительный тракт и, вернувшись, воздействует на датчик. При этом возникают биения. Импульсный регулятор смещает датчик постоянным напряжением 150 В. Он работает как каскодная схема, состоящая из

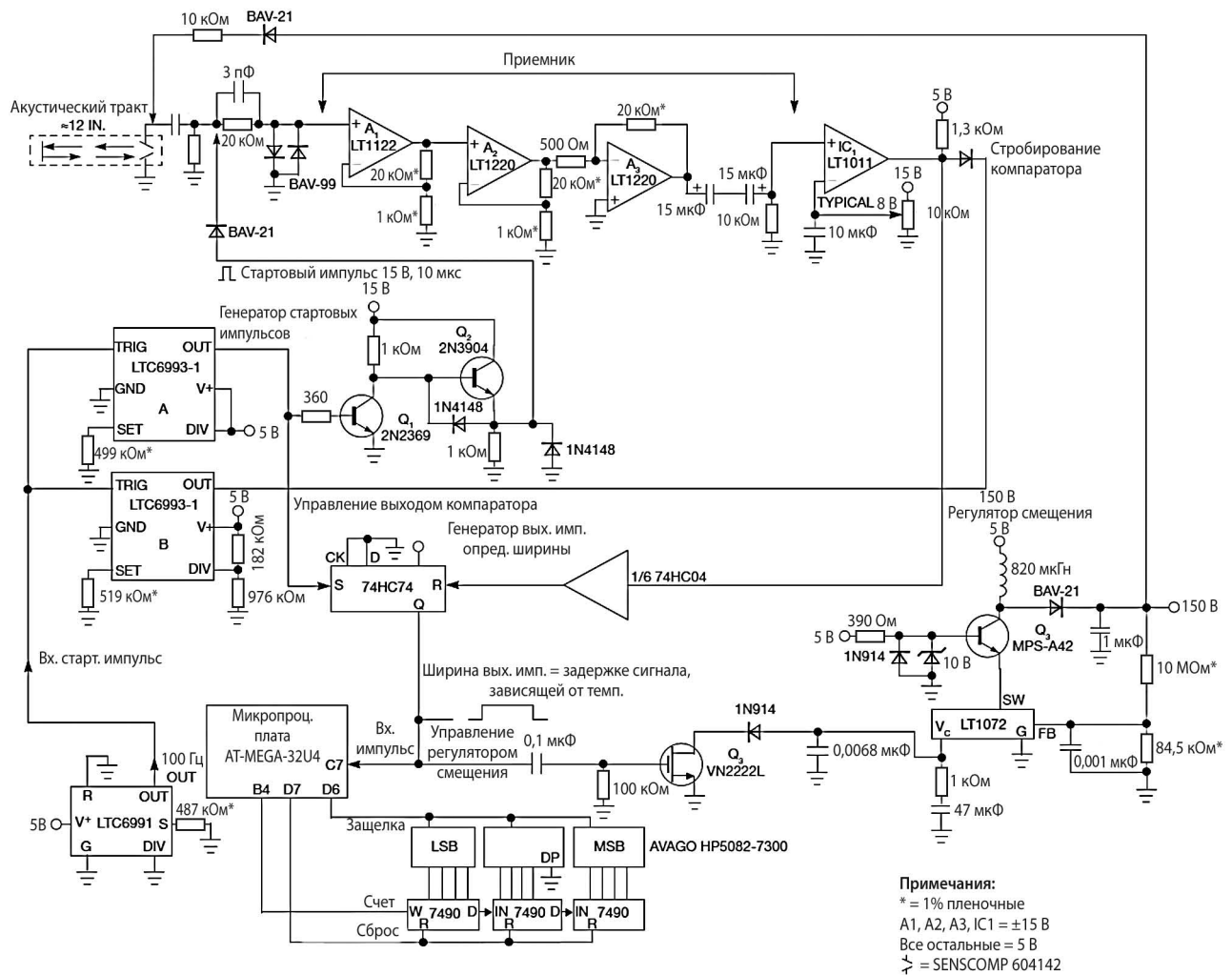


Рис. 4. Реализация схемотехнической концепции, представленной на рисунке 3

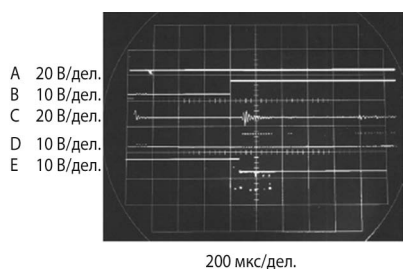


Рис. 5. Диаграммы сигналов: стартового импульса (А), стробирования компаратора (В), выхода усилителя (С), выхода компаратора (D) и выхода мультивибратора (Е)

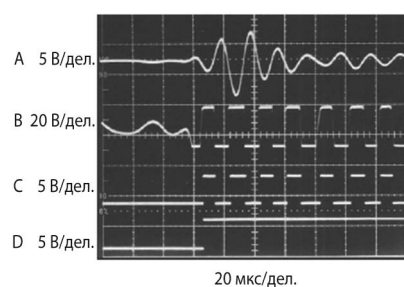


Рис. 6. Обеспечение точности измерения времени прохождения звуковым сигналом тракта

уровень. Срабатывание компаратора сбрасывает мультивибратор, генерирующий выходной импульс, ширина которого пропорциональна времени прохождения звуковым сигналом тракта, зависящего от температуры. Выходной импульс далее передается в микропроцессор, который по его длительности определяет температуру и отображает ее на дисплее [6].

Рассмотрим подробнее изображение на осциллографе в момент, соответствующий возврату звукового сигнала (см. рис. 6). На экране виден сигнал усилителя на выходе ОУ А₂ (диаграмма А). Каскад А₃ еще усиливает сигнал, мягко загоня его в режим насыщения (диаграмма В), что ведет к многократным срабатываниям компаратора IC1 (диаграмма С). Однако выходной сигнал мультивибратора не реагирует на это, оставаясь в низком состоянии после первого срабатывания компаратора, что обеспечивает точность измерения времени прохождения звуковым сигналом всего измерительного тракта (диаграмма D).

внутреннего транзистора ИС и высоковольтного транзистора Q3. Такое большое напряжение смещения позволяет преобразовывать малые изменения емкости за счет незначительного смещения диафрагмы в существенные изменения напряжения. Эти изменения напряжения подаются на усилитель приемника. Емкостная развязка высоковольтного регулятора от датчика и диоды защищают систему от разрушительных перегрузок.

Каскадный усилитель приемника обеспечивает суммарный коэффициент усиления порядка 17600. Работу усилителя можно протестировать, отслеживая сигнал на низкоимпедансном выходе ОУ А₂ (диаграмма С). Последним каскадом усилителя является ОУ А₃, который еще усиливает полученный сигнал. Выход усилителя подключен к компаратору IC1, который срабатывает (диаграмма D), как только сигнал на выходе усилителя превысит отрицательный входной пороговый

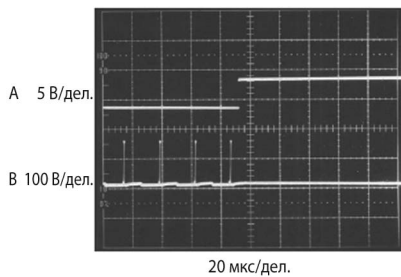


Рис. 7. Стартовый импульс отключает высоковольтный импульсный регулятор на время проведения измерений

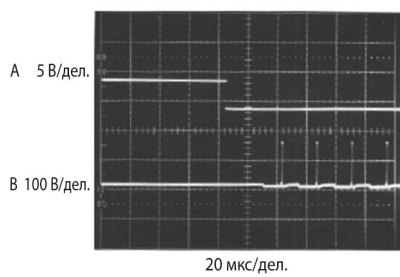


Рис. 8. Выходной сигнал без помех

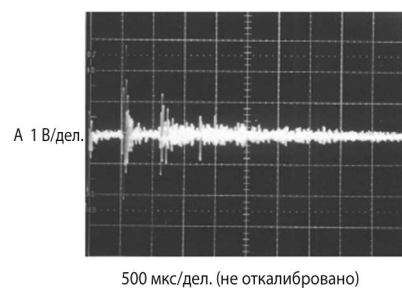


Рис. 9. После четвертого отражения рассеяние звука приводит к полной потере сигнала

Стробирование высоковольтного регулятора смещения позволяет избежать помех на выходе усилителя, связанных с импульсными помехами. Стартовый импульс устанавливает выход мультивибратора в высокое состояние (см. диаграмму А на рисунке 7) и отключает высоковольтный импульсный регулятор на время проведения измерений (диаграмма В).

Такое состояние удерживается в течение всего времени прохождения звукового сигнала по измерительному тракту, что предотвращает ошибки из-за случайного срабатывания компаратора. Возвращение звукового импульса на датчик сбрасывает мультивибратор (см. диаграмму А на рисунке 8). Выходной сигнал мультивибратора подается в схему, которая управляет работой импульсного регулятора через вывод V_C , задерживающий подачу высоковольтного импульсного напряжения до окончания измерительного периода (диаграмма В), что позволяет получить выходной сигнал без помех.

Стробирование выхода компаратора предотвращает его срабатывание от внешних звуковых источников, а стробирование 150-В преобразователя защищает усилитель приемника от разрушительного действия его гармоник. Напряжение смещения (150 В) определяет величину возвращающегося сигнала. Чем оно выше, тем больше амплитуда возвращающегося сигнала. Отключение регулятора на время измерения не сказывается на работе системы. Как показывает опыт, напряжение на выходном конденсаторе емкостью 1 мкФ за это время падает только на 30 мВ, т.е. приблизительно на 0,02%. Такое изменение напряжения является незначительным, и им можно пренебречь.

Использование одного источника питания на 15 В для управления компаратором и формирования стартового импульса повышает стабильность работы схемы, т.к. напряжение компаратора меняется в соответствии с амплитудой поступающего на усилитель сигнала. В системе используется широкополосный высокочувствительный датчик, который обеспечивает хорошую воспроизводимость и отсутствие фазовых искажений. Все это обеспечивает 100-нс, 0,1°F разрешение системы при времени прохождения сигнала равном 1 мс, что соответствует неопределенности 100 промилле. Таким образом, для откалиброванной системы абсолютная точность в интервале 60...90°F не превысит 1°F.

На рисунке 9 показаны результаты эксперимента, в котором приемник датчика срабатывал на множественные звуковые импульсы. Эксперимент проводился для смягчения допусков на синхронизацию. Он показал, что со временем из-за рассеяния звука внутри стеклянной банки возвращающиеся импульсы превращаются в обычный шум. Запуск компаратора по последнему импульсу, конечно, смягчает требования по синхронизации, но делает неприемлемым отношение сигнал/шум. Эта проблема решается с помощью специальных мето-

дов обработки сигнала, однако следует учитывать их влияние на разрешение всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lynnworth LC, and EH Carnevale. "Ultrasonic Thermometry Using Pulse Techniques". *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*. Vol. 4. P. 715. Instrument Society of America. 1972.
2. Mi, XB; SY Zhang; JJ Zhang; and YT Yang, "Automatic Ultrasonic Thermometry". *15th Symposium on Thermophysical Properties*. June 2003//<http://bit.ly/idg2qs>.
3. Williams Jim. "Some Techniques for Direct Digitization of Transducer Outputs". *Linear Technology Corp. February 1985*//<http://bit.ly/h3nadF>.
4. Multiplier Applications Guide. "Acoustic Thermometer". *Analog Devices Inc. P. 11*. 1978.
5. "600 Series Instrument Transducer". *SensComp Inc. Sept. 15*. 2004//<http://bit.ly/gFHnOq>.
6. *Teensy ATmega32u4 USB dev board*. *Adafruit Industries*//<http://bit.ly/gwpJU2>.

Электронные компоненты

С марта 2011 г. фирма «Неон-ЭК» является официальным дистрибьютером Hangzhou Silan Microelectronics, Ltd
Silan Microelectronics — крупнейший китайский производитель полупроводниковых приборов

MOSFET транзисторы по лучшим ценам!

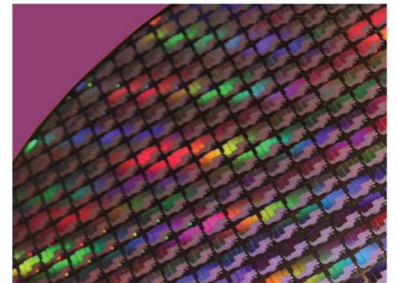
Рабочее напряжение от 400 до 900 вольт. Ток от 1 до 18 ампер

С.-Петербург, ВО, 10-я линия, 39 Тел./факс: (812)335-00-63	Москва, Озерковская наб., 22/24, оф. 14 Тел./факс: (495)953-24-71	Воронеж, Ленинский пр-т, 160а Тел./факс: (473)239-44-46
---	--	--

www.e-neon.ru
www.silan.com.cn

The Power of [Connection]

15–16 мая
«Экспоцентр»
Москва, Россия



Участвуйте в развитии отрасли —

Забронируйте свой стенд на SEMICON Russia 2012 уже сейчас!

SEMICON Russia – это Ваша связь с российским рынком полупроводников. SEMICON Russia позволит Вам расширить круг потенциальных клиентов и познакомит с людьми, определяющими развитие этой отрасли в России. Узнайте о новых возможностях российской и мировой полупроводниковой промышленности – запланируйте свое участие в SEMICON Russia 2012 уже сейчас!

- Конференция по рынку микроэлектроники в России 14 мая в отеле Ренессанс Москва Монарх Центр
- Сессия по фотовольтаике 15 мая на арене SEMI
- Сессия по светодиодам и MEMS 16 мая на арене SEMI
- Выставка полупроводников и фотовольтаики



Проводится совместно с:

SOLARCON[®]
Russia 2012
Конференцией и павильоном

SOLARCON Russia 2012: Ваша связь с российским рынком фотовольтаики!
SOLARCON Russia – это ведущий в России форум для производителей фотовольтаики, проходящий в рамках выставки SEMICON Russia. Присоединяйтесь к компаниям-лидерам в области производства оборудования и технологий для фотовольтаики!

До встречи на SEMICON Россия 2012.

Посетите сайт выставки: www.semiconrussia.org

Проводится одновременно и в одном выставочном комплексе с:

Выставкой «Связь Экспокомм-2012»
24-й международной выставкой телекоммуникационного оборудования, систем управления, информационных технологий и услуг связи.
www.sviaz-expocomm.ru