

ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАСШТАБИРОВАННЫХ MOSFET-ТРАНЗИСТОРОВ

ТАКУРО НИСИМУРА (TAKURO NISHIMURA), Agilent Technologies, Inc.

В статье рассматриваются факторы случайного изменения характеристик и, как следствие, снижения надежности масштабированных MOSFET-транзисторов. К таковым относятся случайная флуктуация легирующей примеси, случайный телеграфный шум (RTN) и температурная нестабильность смещения (VTI). При использовании технологий менее 20 нм наиболее важными факторами для понимания причин изменения характеристик и снижения надежности считаются RTN и VTI, поэтому в статье особенно подробно рассматриваются методы и проблемы их измерения.

ВВЕДЕНИЕ

По мере масштабирования уменьшения геометрических размеров MOSFET-транзисторов их параметры улучшаются, снижается энергопотребление и обеспечивается более высокая степень интеграции, но вместе с тем снижаются надежность и стабильность характеристик.

Случайное изменение характеристик вносит наибольший вклад в быстрое уменьшение процента выхода годных изделий из-за значительного снижения запаса по предельным рабочим режимам или неработоспособности интегральной схемы (ИС), что может иметь место даже при правильной работе каждого элемента схемы в отдельности.

Случайная флуктуация легирующей примеси (RDF) — это основной фактор случайного изменения характеристик, но помимо этого считается, что при использовании технологии менее 20 нм основной вклад в случайное изменение характеристик вносит случайный телеграфный шум (RTN). Последние исследования показали, что RTN может быть связан с температурной нестабильностью смещения (VTI), приводящей к снижению надежности.

В масштабированных MOSFET-транзисторах изменения характеристик, обусловленные RTN и VTI, — это важные факторы, влияющие на функциональные возможности схем и устройств и на снижение надежности, но методы измерения этих влияний понимают далеко не все.

СНИЖЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Изменения характеристик могут быть глобальными, локальными,

систематическими и случайными. Случайное изменение вносит наибольший вклад в быстрое уменьшение процента выхода годных изделий из-за значительного снижения запаса по предельным рабочим режимам или неработоспособности интегральной схемы (ИС), что возможно даже при правильной работе каждого элемента схемы в отдельности.

Ухудшение надежности — это сложный вопрос, который следует внимательно рассматривать, поскольку его недооценка приводит к нарушению функциональности схемы, а переоценка — к значительному усложнению или даже невозможности реализации разрабатываемого изделия.

СЛУЧАЙНЫЙ ТЕЛЕГРАФНЫЙ ШУМ (RTN)

RTN в MOSFET-транзисторе появляется за счет того, что носитель заряда (дырка или электрон) захватывается оксидной ловушкой, а затем испускается ею. Непрерывный процесс захвата и испускания носителей заряда ловушкой приводит к флуктуациям тока стока (I_c), в результате чего смещается пороговое напряжение ($V_{пор}$). Отношение постоянной времени испускания захваченного заряда (τ_n) к постоянной времени захвата заряда (τ_s) выражается следующим образом:

$$\tau_n/\tau_s = A \exp(-(E_t - EF)/kT),$$

где A — степень вырождения; E_t — энергетический уровень ловушки; EF — уровень Ферми; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Как показано на рисунке 1, в представлении сигнала RTN во временной области имеет место двоичная флуктуация тока I_c (т.е. $V_{пор}$) из-за непрерывного процесса захвата и испускания носителей заряда одной ловушкой. В частотной области сигнал RTN обратно пропорционален квадрату частоты (т.е. $1/f^2$) после плогого участка кривой в НЧ-области.

Случайная флуктуация легирующей примеси (RDF) — это основной фактор случайного изменения характеристик, но помимо этого считается, что при использовании технологии менее 20 нм основной вклад в случайное изменение характеристик вносит случайный телеграфный шум (RTN), поскольку согласно простой модели RTN величина сдвига $V_{пор}$ обратно пропорциональна площади затвора (т.е. $1/LW$) для RTN и обратно пропорциональна квадратному корню из площади затвора для RDF.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ СМЕЩЕНИЯ И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ ПРОБЛЕМЫ

При температурной нестабильности смещения (VTI) возникает проблема надежности изолирующего слоя затвора, связанная со сдвигом порогового напряжения ($V_{пор}$) MOSFET-транзистора. Об уменьшении $V_{пор}$ из-за VTI известно еще с 1960-х гг. В конце 1990-х гг. специалисты пришли к выводу, что надежность — основная проблема для масштабирования в MOSFET-технологии.

Вблизи границы раздела подложки (Si) и подзатворного диэлектрика (SiO_2) MOSFET-транзистора имеются дефекты типа разорванных связей,

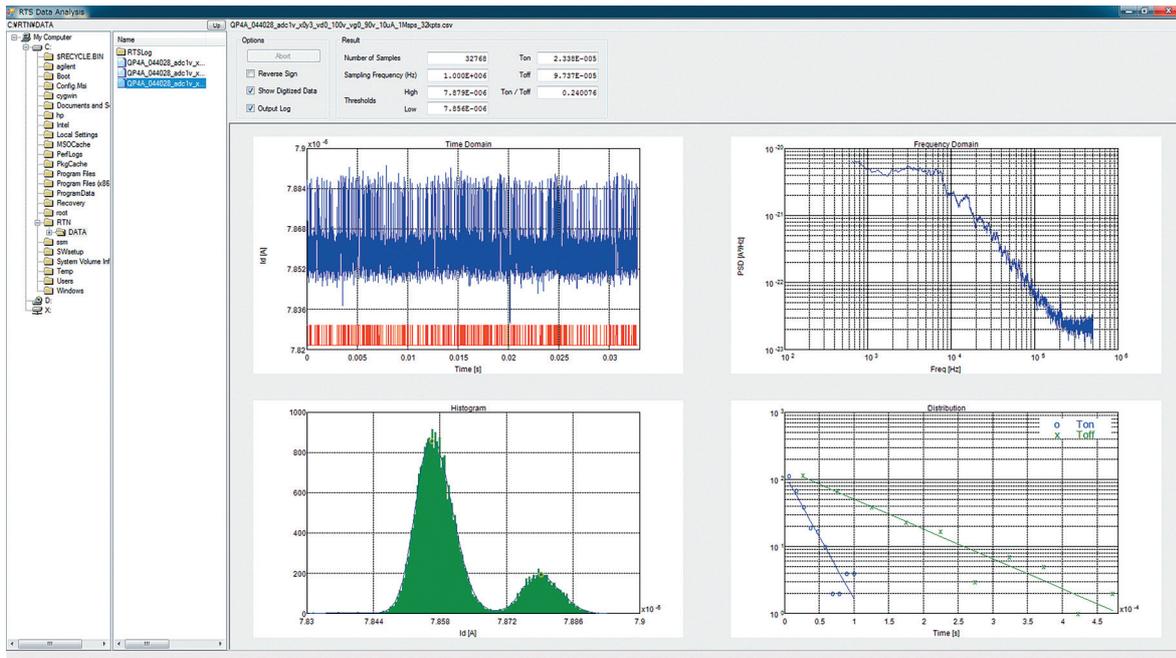


Рис. 1. Представление во временной области (слева вверху) и в частотной области (справа вверху) сигнала RTN. Представлены также гистограмма тока I_c (слева внизу) и гистограмма τ_n и τ_p (справа внизу)

которые приводят к ухудшению характеристик транзистора. Чтобы не допустить этого явления, после формирования подзатворного оксида следует выполнить отжиг в среде водорода для создания связи Si-H. Это позволит восстановить нарушенную структуру кремния.

При подаче на затвор р-канального MOSFET-транзистора отрицательного смещения дырки становятся основными носителями. На границе раздела Si-SiO₂ после взаимодействия дырки с Si-H появляется разорванная связь атома кремния, которая задает переходное состояние, и генерируются ионы H⁺. Сгенерированные ионы H⁺ диффундируют в оксид и захватываются им. Они сталкиваются с носителями заряда, что приводит к уменьшению тока I_c и сдвигу напряжения $V_{пор}$, как это показано на рисунке 2.

Эта теория реакции-диффузии (RD) получила широкое признание, но в некоторых современных полупроводниковых приборах наблюдается явление быстрого восстановления, в результате которого характеристики восстанавливаются после прекращения действия поля смещения затвора, поэтому механизм захвата-испускания зарядов ловушкой, приводящий к появлению RTN, также был всесторонне исследован.

В настоящее время специалисты пришли к выводу, что ВТИ имеет две составляющие: обратимую, восстановление которой начинается

сразу после снятия поля смещения затвора, и необратимую, которая не восстанавливается или практически не восстанавливается. Кроме того, было признано, что снижение надежности масштабированных MOSFET-транзисторов заметнее при отрицательной температурной нестабильности (NBTI), чем при положительной температурной нестабильности (PBTI).

Последние исследования показали, что RTN и обратимая составляющая ВТИ обусловлены одинаковыми дефектами, но вместе с тем был сделан вывод, что RTN и ВТИ — это некоррелированные факторы, отрицательно влияющие на

характеристики устройства. Чтобы сделать окончательные выводы о влиянии RTN и ВТИ, необходимо продолжать исследования с выполнением точных измерений.

ВЛИЯНИЕ RTN НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

RTN приводит к появлению фазового шума и увеличению джиттера в аналоговых схемах, а также к уменьшению запаса похороустойчивости статического ОЗУ (SRAM) в цифровых схемах. Сдвиг $V_{пор}$ MOSFET-транзистора значительно влияет на SRAM в больших интегральных схе-

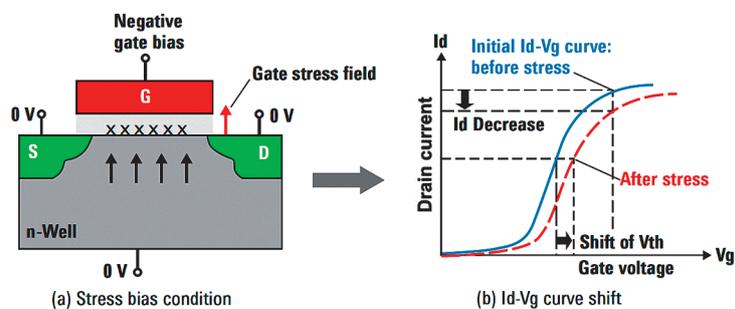


Рис. 2. Отрицательная температурная нестабильность (NBTI) в р-канальных MOSFET-транзисторах

S — исток; G — затвор; D — сток; n-Well — карман n-типа; Negative gate bias — отрицательное напряжение смещения затвора; Gate stress field — поле смещения затвора; Stress bias condition — режим смещения затвора; Drain current — ток стока; I_d Decrease — снижение I_d ; Initial I_d - V_g curve: before stress — начальная зависимость I_d от V_g перед подачей поля смещения затвора; After stress — после подачи поля смещения затвора; Shift of V_{th} — сдвиг порогового напряжения $V_{пор}$; I_d - V_g curve shift — сдвиг зависимости I_d от V_g ; Gate voltage — напряжение затвора; V — В

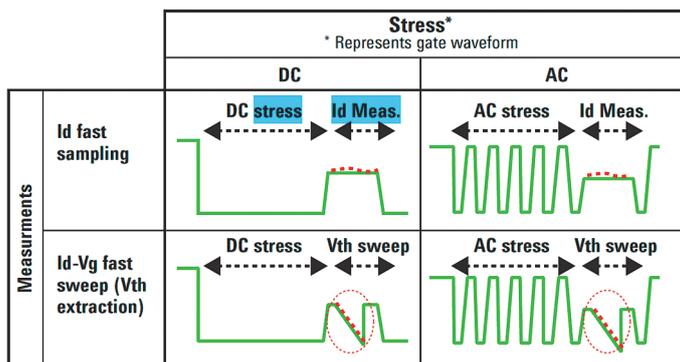


Рис. 3. Подача воздействующего сигнала и поточечное/свипирующее измерение I_c для определения отрицательной температурной нестабильности смещения (NBTI)

Measurements — измерения; I_c fast sampling — быстрое поточечное измерение I_c ; I_c - V_g fast sweep (Vth extraction) — быстрое свипирование I_c - V_g (извлечение V_{th}); DS stress — воздействие постоянного напряжения; DS — постоянное напряжение; I_c Meas. — измерение I_c ; V_{th} sweep — свипирование V_{th} ; Stress — воздействующий сигнал; AC stress — воздействие переменного напряжения; Represents gate waveform — форма напряжения на затворе; AC — переменное напряжение; I_c Meas. — измерение I_c

мах (БИС), в результате чего возникает серьезная проблема, связанная с выходом годных устройств и характеристиками БИС.

Оптимизация запаса по характеристикам при проектировании возможна при достаточном количестве статистических данных для получения оценок. При небольшом количестве статистических данных оценить влияние изменений параметров технологического процесса затруднительно, и если недооценка изменчивости характеристик абсолютно неприемлема, то статистическая ошибка на входе симулятора схемы может привести к нежелательным последствиям. В этом случае проектирование схемы существенно затрудняется и рано или поздно становится невозможным. Следовательно, очень важно правильно измерять изменчивость и оценивать ее влияние, чтобы исключить недооценку и чрезмерную оценку изменчивости.

Если сдвиг $V_{пор}$, обусловленный RTN, строго соответствует простому статистическому распределению, то прогнозирование с определенной вероятностью может быть выполнено на основе небольшого количества данных. На самом деле из-за множества дефектов статистическое распределение сложнее. Так, концевая часть реального распределения длиннее, чем у нормального распределения, поэтому для оценки наилучшего значения требуется большое количество статистических данных.

Следовательно, очень важно правильно прогнозировать наихудшее значение, применяя статистические методы оценки, и учитывать результаты при проектировании схемы и подготовке технологического процесса. На практике изменение $V_{пор}$ в зависимости

от RTN достигает 70 мВ при использовании топологической нормы 20 нм. В ближайшем будущем при разработке новых технологий изменение $V_{пор}$ в зависимости от RTN может превысить изменение $V_{пор}$ в зависимости от RDF.

При наличии ВТИ необходимо оценить ухудшение характеристик, включая составляющую с быстрым восстановлением, с учетом надежности. Чтобы не переоценить влияние ВТИ, необходимо отделить эту составляющую от других, поскольку она оказывает основное влияние на снижение надежности.

ИЗМЕРЕНИЕ RTN

Для измерения RTN MOSFET-транзистора с тремя выводами к нему необходимо приложить напряжения между затвором и истоком ($V_{з-и}$) и между стоком и истоком ($V_{с-и}$), после чего измеряется ток стока (I_c). Для исследования зависимости I_c от времени выполняется многократное измерение I_c с постоянной частотой выборки. Поскольку постоянные времени RTN зависят от конкретного дефекта каждого устройства, то их значения лежат в широком диапазоне 1 мкс...1000 с и более. Поэтому важно правильно задать частоту выборки и длительность записи, т.к. при низкой частоте выборки нельзя наблюдать за процессом с малой постоянной времени, а при высокой частоте выборки количество данных может значительно увеличиться, что затруднит их обработку и анализ.

ИЗМЕРЕНИЕ ВТИ

Процедура выполняется в два этапа. Сначала следует этап подачи воздействующего сигнала, потом — этап измерения (см. рис. 3). При измерении ВТИ MOSFET-транзистора с тремя

выводами на этапе подачи воздействующего сигнала подается требуемое напряжение стока $V_{с-и}$, а в качестве $V_{з-и}$ подается постоянное смещение (воздействие постоянным напряжением) или импульсное смещение произвольной формы (воздействие переменным напряжением). Во время этапа измерения подается требуемое напряжение $V_{с-и}$ и несколько раз подряд измеряется значение тока I_c при постоянном напряжении $V_{з-и}$ (поточечное измерение) или при свипировании напряжения $V_{з-и}$ для поиска $V_{пор}$ (свипирующее измерение).

Этап подачи напряжения и этап измерения выполняются до тех пор, пока не будут перебраны все режимы и не выполнены все измерения.

МАЛОШУМЯЩЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

Для измерения I_c при измерении RTN или ВТИ понадобится прибор, осуществляющий оцифровку тока или напряжения, например, осциллограф или векторный анализатор сигналов с преобразователем тока в напряжение. Этот преобразователь должен иметь низкий уровень собственных шумов и полосу частот, соответствующую полосе измеряемого сигнала. В дополнение к преобразователю тока в напряжение источники напряжений $V_{з-и}$ и $V_{с-и}$ также должны быть малошумящими и иметь полосу пропускания, достаточную для подачи требуемых напряжений смещения.

Что касается источника смещения, то при измерении RTN требуется только постоянное смещение, а для подавления шума смещения может использоваться ФНЧ. ФНЧ сужает полосу пропускания, поэтому при измерении ВТ с воздействием переменным напряжением или при быстром измерении ВТИ он не используется. Следовательно, сам источник смещения должен быть малошумящим и иметь достаточную полосу частот.

Любой измерительный прибор из числа перечисленных ниже можно использовать для измерения RTN и ВТИ:

- осциллограф или векторный анализатор сигналов с высокоскоростным дискретизатором и преобразователем тока в напряжение. В дополнение к ним необходимо иметь малошумящие источники смещения;
- источник-измеритель (SMU), который может подавать точные напряжение и токи, одновременно измеряя напряжение и/или ток. Такой прибор содержит встроенные источники смещения, поэтому дополнительный источник смещения не требуется. Однако этот источник не применим для точных высокоскоростных измерений, например, RTN

с малой постоянной времени или быстро изменяющейся составляющей ВТИ;

- специализированный измерительный прибор, такой как Agilent B1530A. Все функции измерения RTN и ВТИ реализованы в одном приборе. Прибор может выполнять точные измерения с высокой скоростью.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ RTN

Постоянные времена RTN зависят от конкретных дефектов каждого исследуемого устройства, что затрудняет прогнозирование диапазона времени для наблюдения за сигналом RTN. Чтобы определить соответствующий диапазон времени, надо экспериментально свипировать частоту выборки. Например, можно выполнить измерение по 32 768 точкам тока I_c с частотами дискретизации 1 Мвыб/с, 100, 10 и 1 квыб/с. При наличии сигнала RTN с постоянными времени от 10 мкс до 1 с, диапазон времени наблюдения может быть равен 30 с. При отсутствии сигнала RTN следует попытаться увеличить частоту выборки до 10 Мвыб/с или уменьшить до 100 выб/с.

При высокой частоте выборки необходимо проверить, достаточно ли полоса пропускания устройства для измерения в этом диапазоне. При низкой частоте выборки может возникнуть необходимость ограничения полосы пропускания во избежание наложения спектров, в частности, при выполнении анализа в частотной области. В первом из указанных вариантов необходимо проверить все компоненты измерительного прибора, такие как дискретизатор и преобразователь тока в напряжение. Во втором варианте нужно использовать более высокую частоту выборки и цифровой фильтр (ФНЧ). Более легкий путь — усреднение необработанных данных за период измерения, если используемый прибор имеет функцию усреднения. Усреднение подобно НЧ-фильтрации, при этом полоса пропускания фильтра регулируется для подавления наложенных спектров.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВТИ И НАКОПЛЕННЫЙ ОПЫТ

При измерении составляющей ВТИ с быстрым восстановлением очень важно синхронизировать воздействующий сигнал и процесс измерения, поскольку восстановление начинается сразу после прекращения подачи сигнала. Следовательно, первое измерение следует начинать не менее чем через 1 мкс после снятия сигнала, чтобы точно исследовать составляющую ВТИ с быстрым восстановлением. Стандартный измерительный прибор, такой как источник-измери-

тель, может выполнить измерение с задержкой 10 мс или более, поэтому для измерения с задержкой в пределах 1 мкс потребуется специализированное устройство.

При необходимости всестороннего анализа обратимой составляющей и необратимой составляющей ВТИ диапазон времени измерения ВТИ может быть от 1 мкс до 1 млн с. В течение всего периода измерения практически невозможно поддерживать постоянную частоту выборки, т.к. общее количество данных для обработки будет слишком велико. На практике выбирают небольшой период времени измерения и логарифмически увеличивают длительность между каждым следующим периодом измерения (интервал между измерениями). Например, если период измерения начинается через 1, 2, 5, 10, 20, 50 мкс, ... 500 тыс. с и 1 млн с, то число периодов измерения равно 37 и общее количество данных может быть обработано.

ЗОНДОВАЯ СТАНЦИЯ

При использовании зондовой станции для измерения RTN или ВТИ следует учесть следующие рекомендации:

- расстояние между исследуемым устройством и измерительным прибором должно быть минимальным. Матричный коммутатор, через который поступают сигналы от зондовой станции, может отрицательно влиять на уровень шума и полосу пропускания;
- рекомендуется использовать малошумящую зондовую станцию. Вместо автоматической зондовой станции лучше использовать полуавтоматическую или ручную зондовую станцию;
- не уделяйте слишком много внимания экранированию игл пробников, источника питания и помещения.

Если требуется оценить ухудшение большой постоянной времени RTN или большого периода ВТИ, то время измерения должно быть увеличено. В этом случае для повышения точности измерения выполняются параллельно несколькими устройствами.

Дополнительная информация об RTN, ВТИ и специализированных приборах для измерения RTN и ВТИ приведена в материалах, представленных в списке литературы.

ВЫВОДЫ

В масштабированных MOSFET-транзисторах RTN и ВТИ вносят основной вклад в снижение надежности и изменение характеристик. Следовательно, очень важно правильно понимать эти явления и знать методы измерения, позволяющие точно

оценить их влияние на проектируемые схемы и устройства.

Для уменьшения влияния RTN и ВТИ следует учитывать многие факторы, но при наличии подходящего измерительного прибора можно учесть небольшое число факторов и легко приступить к исследованию RTN и ВТИ для решения проблем, связанных со снижением надежности и изменением характеристик MOSFET-транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Kriton, M. Uren. *Noise in solid-state microstructure: microstructure: a new perspective on individual defects interface states and low frequency noise*//*Adv. Phys.*, vol. 38, no. 4, 1989.
2. N. Tega, H. Miki, T. Osabe, A. Kotabe, K. Otsuga, H. Kurata, S. Kamohara, K. Tokami, Y. Ikeda, R. Yamada. *Anomalous large threshold voltage fluctuation by complex random telegraph signal in floating gate flash memory*//*IEEE International Electron Devices Meeting*, 2006.
3. T. Grasser, B. Kaczer, W. Goes, H. Reisinger, T. Aichinger, P. Hehenberger, P.-J. Wagner, F. Schanovsky, J. Franco, M.T. Luque, M. Nelhiebel. *The paradigm shift in understanding the bias temperature instability: from reaction — diffusion to switching to oxide traps*//*Electron Devices, IEEE Transactions*, vol. 58, issue 11, 2011.
4. S.-M. Amoroso, L. Gerner, S. Markov, F. Adamu-Lema, Asen Asenov. *RTN and BTI in nanoscale MOSFETs: a comprehensive statistical simulation study*//*Solid-State Electronics*, vol. 84, 2013.
5. N. Tega, H. Miki, F. Pagette, D. Frank, A. Ray, M. Rooks, W. Haensch, K. Torii. *Increasing threshold voltage variation due to random telegraph noise in FETs as gate lengths scale to 20 nm*//*VLSITechnology Symposium*, 2009.
6. T. Shimizu, I. Kato, S. Yokogawa et al. *Vth Fluctuations due to random telegraph signal on work function control in hf-doped silicate gate stack*//*IEEE Reliability Symposium 2009*.
7. A. Subirats, X. Garros, J. Mazurier, J. El Hussein, O. Rozeau, G. Reimbold, O. Feynot, G. Ghibaudo. *Impact of dynamic variability on SRAM functionality and performance in nano-scaled CMOS technologies*//*International Reliability Physics Symposium*, 2013.
8. Y. Tsai, N. Jha, Y. Lee, R. Ranjan, W. Wang, J. Shih, M. Chen, J. Lee, K. Wu. *Prediction of NBTI degradation for circuit under AC operation*//*International Reliability Physics Symposium*, 2010.
9. *Agilent B1500A semiconductor device analyzer — ultra-fast 1µs NBTI characterization using the Agilent B1500A's WGFMU Module*//*Application Note B1500-10, 5989-9963EN*, 2008.
10. *Characterizing random noise in CMOS image sensors — RTS noise measurement using the B1500A's WGFMU Module*//*Application Note B1500-11, 5990-3705EN*, 2009.
11. *1µs IV Characterization of flash memory cells using the Agilent B1530A*//*Application Note B1500-12, 5990-3636EN*, 2009.