

УДК 621.382

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МДП-СТРУКТУРАХ

К. ф.-м. н. В. М. Попов

Научно-исследовательский институт микроприборов  
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины  
Украина, г. Киев  
microic@voliacable.com

*Разработан усовершенствованный метод определения скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда в МДП-структурах. Метод основан на анализе динамических неравновесных вольт-амперных характеристик МДП-конденсаторов со ступенчатым профилем диэлектрика. Применение метода позволяет повысить точность и информативность исследования поверхностной генерации в МДП-структурах.*

*Ключевые слова: МДП структуры, скорость поверхностной генерации.*

Одним из важнейших параметров, характеризующих качество структур «диэлектрик — полупроводник» (ДП) и «металл — диэлектрик — полупроводник» (МДП) в технологии микроэлектроники является скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда  $S_g$ . Возрастание  $S_g$  повышает обратные токи  $p$ - $n$ -переходов, снижает время хранения информационного заряда в элементах памяти динамических запоминающих устройств, увеличивает токи потребления в больших интегральных схемах (БИС). Следовательно, анализ  $S_g$  актуален при контроле качества ДП-, МДП-структур на этапах разработки и производства полупроводниковых приборов.

Существуют методы определения  $S_g$  в режиме стационарной генерации с помощью МДП управляемых  $p$ - $n$ -переходов [1]. Однако для формирования данных структур требуется полный технологический цикл изготовления МДП-транзисторов. В то же время наибольший практический интерес представляет определение  $S_g$  в системе ДП непосредственно после создания диэлектрика без формирования  $p$ - $n$ -переходов. В этом случае в качестве тестовой структуры целесообразно применение МДП-конденсаторов. Однако измерение  $S_g$  в обычных МДП-конденсаторах [2, 3] имеет существенное ограничение: в неравновесных условиях вследствие быстрого накопления неосновных носителей в инверсионном слое происходит резкое снижение поверхностной составляющей в общем токе генерации и, как следствие, определяются заниженные (эффективные) значения исследуемого параметра. В настоящее время корректный метод определения  $S_g$  в МДП-конденсаторах отсутствует.

Целью работы являлась разработка метода определения скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда непосредственно в МДП-конденсаторах, обладающего преимуществами, свойственными измерению данного параметра в МДП-управляемых  $p$ - $n$ -переходах.

Для точного определения  $S_g$  в МДП-конденсаторах необходимо создать условия полного обеднения поверхности полупроводника зарядами обоих знаков, обеспечивающие появление максимальных значений тока поверхностной генерации, который протекает в течение промежутка времени, достаточного для его надежной регистрации.

В работе предложен метод, позволяющий корректно измерять величину  $S_g$  непосредственно в МДП-конденсаторах. Метод основан на анализе динамических неравновесных вольт-амперных характеристик (ДНВАХ) МДП-конденсаторов специальной конструкции. Применение ДНВАХ обусловлено их более высокой чувствительностью к регистрации генерационных процессов в МДП-структурах по сравнению с традиционными методами высокочастотных вольт-фарадных характеристик [4]. МДП-конденсатор, предложенный для определения  $S_g$ , имеет диэлектрик с чередующимися областями разной толщины  $d_1$  и  $d_2$  (ступенчатый профиль) [5] (рис. 1). Суммарные площади областей

с тонким и толстым диэлектриком составляют соответственно  $A_1$  и  $A_2$ . Измерение  $S_g$  осуществляется на участках с большей толщиной диэлектрика  $d_2$ .

Сущность метода заключается в следующем. В процессе приложения к МДП-структуре со ступенчатым диэлектриком инвертирующего линейно возрастающего напряжения (ЛВН) со скоростью  $K$ , превышающей скорость равновесного формирования инверсионного слоя, его образование на участках с тонким диэлектриком происходит при меньших напряжениях, чем в области толстого диэлектрика. При напряжениях, соответствующих началу инверсии в области толстого диэлектрика, участки с тонким диэлектриком уже находятся в состоянии более глубокого неравновесного обеднения, имеют более высокий поверхностный потенциал и представляют собой потенциальные ямы для неосновных носителей заряда, генерируемых под толстым диэлектриком. В результате по периметру областей толстого диэлектрика возникает краевое электрическое поле, «отсасывающее» из них генерируемые неосновные носители заряда. В этом случае формирования инверсионного слоя на этих участках не происходит. Таким образом, в пределах областей с толстым диэлектриком выполняются условия реализации максимальной скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда. Возникающий ток поверхностной генерации поступает в инверсионные слои под областями с тонким диэлектриком (фигурные стрелки на рис.1) и дает вклад в общий ток ДНВАХ. Этот постоянный ток существует до тех пор, пока поверхностные потенциалы в областях с диэлектриком разной толщины не выровняются, после чего инверсионный слой начинает образовываться в областях с толстым диэлектриком и поверхностная генерация в них падает до нуля.

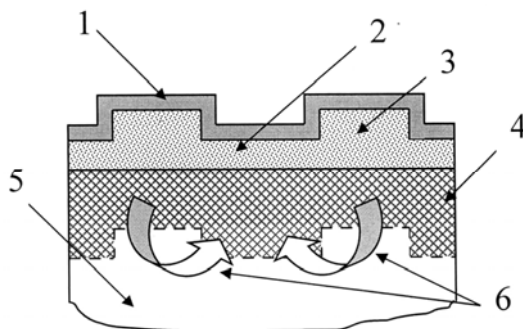


Рис. 1. МДП-конденсатор со ступенчатым диэлектриком в неравновесных условиях:  
 1 — металл; 2 — диэлектрик толщиной  $d_1$ ; 3 — диэлектрик толщиной  $d_2$ ;  
 4 — область пространственного заряда в полупроводнике; 5 — квазинейтральный полупроводник; 6 — токи поверхностной генерации из областей с толстым диэлектриком

На ДНВАХ таких МДП-структур регистрируется хорошо выраженный ток поверхностной генерации. Сравнение ДНВАХ МДП-конденсаторов со ступенчатым диэлектриком и с диэлектриком постоянной толщины представлено на рис. 2. В МДП-структуре с диэлектриком постоянной толщины на ДНВАХ практически не наблюдается поверхностной генерации, которая, не достигая своих истинных значений, быстро уменьшается в результате роста поверхностной концентрации неосновных носителей заряда в инверсионном слое. В той же технологической системе ДП в случае ступенчатого профиля диэлектрика ток поверхностной генерации достигает своих максимальных значений, явно выражен и поддерживается в МДП-структуре в течение определенного времени, достаточного для надежной регистрации.

Важное значение для точного определения  $S_g$  играют геометрические размеры областей с толстым и тонким диэлектриком. Необходимо иметь в виду, что вследствие вытекания неосновных носителей из области с более толстым диэлектриком положение их квазиуровня Ферми на границе раздела ДП в направлении переноса не является постоянным [6]. Поэтому пространственно изменяется величина  $S_g$  в исследуемой области. Этот эффект растет с увеличением расстояния от центра электрода до его края  $L_s$  и приводит к занижению измеряемых значений  $S_g$  по сравнению с их реальными значениями. В соответствии с результатами исследований подобного явления в МДП управляемых  $p$ - $n$ -переходах [6], в предложенных структурах для корректного определения  $S_g$  рекомендовано соблю-

дать аналогичные требования по минимизации  $L_s$  (т. е. размеров электродов) в областях с толстым диэлектриком.

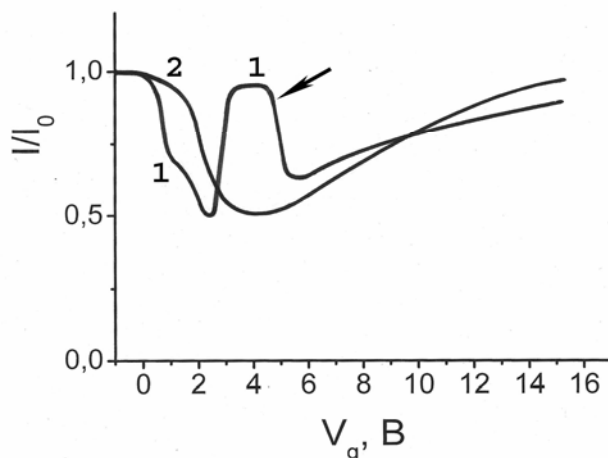


Рис. 2. ДНВАХ структуры Al-SiO<sub>2</sub>-Si со ступенчатым диэлектриком ( $d_1 = 600 \text{ \AA}$ ,  $d_2 = 1200 \text{ \AA}$ ,  $A_1/A_2=1$ ) (1) и с диэлектриком постоянной толщины (2) при одинаковых свойствах границы раздела ДП (Ток поверхностной генерации указан стрелкой, скорость роста напряжения  $K=1 \text{ В/с}$ )

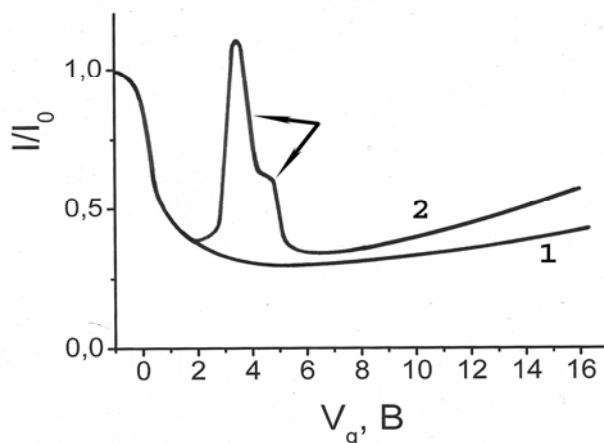


Рис. 3. ДНВАХ структуры Al-SiO<sub>2</sub>-Si со ступенчатым диэлектриком ( $d_2 = 1200 \text{ \AA}$ ,  $d_1/d_2 \approx 0,5$ ;  $A_1 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $A_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ ) до облучения (1) и после селективного облучения электронами с энергией 25 кэВ при дозе облучения  $1 \cdot 10^{14} \text{ 1/см}^2$  (2) (Ток поверхностной генерации указан стрелками, скорость роста напряжения  $K=2 \text{ В/с}$ )

В работе получено аналитическое выражение для расчетов  $S_g$  по ДНВАХ МДП-структур со ступенчатым диэлектриком. Для определения  $S_g$  необходимо знать величину объемного генерационного времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_g$ . Величина  $\tau_g$  определяется по ДНВАХ согласно [7] при сильной инверсии на поверхности полупроводника, обеспечивающей выравнивание поверхностного потенциала по всей площади исследуемой МДП-структуры. Кроме того, предложена модификация метода, позволяющая экспрессно измерять  $S_g$ .

Процесс подготовки образцов включает в себя создание диэлектрика и формирование исследуемой границы раздела ДП, после чего проводятся фотолитография и химическое травление диэлектрика до требуемой толщины (обычно  $d_1/d_2 \approx 0,5$ ). Далее формируются электроды в соответствии с применяемой технологией изготовления изделий.

Большое практическое значение имеет точное определение  $S_g$  в МДП-структурах после различных видов облучения. Анализ физических явлений, происходящих в неравновесных условиях в

МДП-структурах со ступенчатым диэлектриком, позволил предложить новый метод определения скорости поверхностной генерации в облученных системах ДП и МДП. В этом случае селективному облучению подвергается малый участок площади образца (например, через маску). Поскольку образующийся в оксиде радиационный заряд всегда положителен, облученная область структуры Si — SiO<sub>2</sub> на кремнии *n*-типа с локально повышенным пороговым напряжением при измерении ДНВАХ ведет себя аналогично участкам с толстым оксидом в МДП-структурах со ступенчатым диэлектриком. При этом за счет уменьшения площади облучения (A<sub>2</sub>) достигается снижение флуктуаций электрофизических свойств на облученном участке, что позволяет в ряде случаев регистрировать более тонкие изменения тока поверхностной генерации (рис. 3).

Исследованы значения S<sub>g</sub> в МДП-конденсаторах и управляемых *p-n*-переходах структуры Al — SiO<sub>2</sub> — Si с термически выращенным оксидом толщиной 1000—1200 Å. Структуры были изготовлены на кремнии КЭФ-4,5 по технологии БИС. Толщина более тонкого оксида после химического травления находилась в пределах 500—600 Å. Области с толстым и тонким оксидом располагались равномерно по всей площади под электродами. Характерный размер электродов L<sub>s</sub> составлял от 10 до 100 мкм.

Скорость S<sub>g</sub>, найденная в МДП-конденсаторах со ступенчатым диэлектриком, достигала максимальных (истинных) значений при L<sub>s</sub> ≤ 50 мкм. В исследованных технологических структурах величина S<sub>g</sub> определена в диапазоне 0,5 – 10 см/с и в каждом случае соответствовала значениям, полученным с применением МДП управляемых *p-n*-переходов.

Следовательно, впервые разработан метод, позволяющий точно определять скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда непосредственно в МДП-конденсаторах. Обоснована конструкция специальных тестовых структур для корректного определения S<sub>g</sub>. Показана возможность повышения информативности исследований поверхностной генерации в МДП-структурах при воздействии различных видов излучения. Метод продемонстрировал высокую эффективность при контроле технологии формирования структур Si — SiO<sub>2</sub> при изготовлении БИС.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Fitzgerald D. J., Grove A. S. Surface recombination in semiconductors // Surface Science.— 1968.— N 2.— P. 347—369.
2. Schroder D. K. Semiconductor material and device characterization.— Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006.
3. Попов В.М. Определение скорости поверхностной генерации неосновных носителей по динамическим неравновесным вольт-амперным характеристикам МДП-структур // Микроэлектроника.— 1977.— № 3.— С. 269—275.
4. Popov V. M., Pokanevich A. P., Panin A. I. Bulk generation lifetime studies in semiconductor structures with nonuniform distribution of electrically active defects in silicon // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.— 2002.— N 1—4.— P. 88—93.
5. А. с. 1414232 СССР. Тестовая МДП структура / В. М. Попов, В. М. Сухостаев.— 1988.
6. Pierret R. F. The gate-controlled diode s<sub>0</sub> measurement and steady state lateral current flow in deeply depleted MOS structures // Solid State Electronics.— 1974.— N 12.— P. 1257—1269.
7. Попов В.М. Исследование профилей распределения объемного генерационного времени жизни неосновных носителей в МДП структурах // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 1991.— № 20.— С. 12—15.

V. M. Popov

#### **The method for investigation of surface generation velocity of minority carriers in MIS structures.**

An improved method for determination of the surface generation velocity of minority carriers in MIS structures has been developed. The method is based on the analysis of the dynamic unsteady-state current-voltage characteristics of MIS capacitors with stepped-like profile of dielectric. Application of the method improves the accuracy and comprehension of the surface generation study in MIS structures.

Keywords: *MIS structures, surface generation velocity.*