

В. В. КУШНИРЕНКО, к. ф.-м. н. Г. К. НИНИДЗЕ,  
к. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, Л. Д. КОНОВАЛЕНКО

Украина, Киевский национальный ун-т имени Тараса Шевченко;  
Одесский национальный ун-т им. И. И. Мечникова  
E-mail: pps@mail.univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
18.01 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. ЕВТУХ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ИМПУЛЬСА ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

*Определены параметры кремниевых диффузионных резисторов, необходимые для расчета их конструктивных и эксплуатационных характеристик. Предложена физическая модель, описывающая закономерности, происходящие в резисторах.*

Дальнейшая миниатюризация электронной аппаратуры, несомненно, будет сопровождаться ускоренным освоением области работы ее компонентов в условиях протекания через них токов сверхбольших плотностей. В этом случае могут проявляться как новые, перспективные для дальнейшего использования эффекты, так и процессы, приводящие к деградации микронэлектронных приборов. В зарубежных публикациях преобладает информация о работах по оценке надежности полупроводниковых приборов, базирующаяся на всестороннем исследовании закономерностей развития и механизмов деградации, приводящих к отказам того или иного типа. Целью таких работ является снижение скорости и величины деградации и выявление ранних признаков (предвестников) быстрой и сильной деградации в ходе дальнейшей работы прибора. Публикаций, посвященных новым эффектам, относительно мало.

В [1, 2] подробно описаны результаты исследований кремниевых диффузионных резисторов (КДР) в стационарном режиме. Стационарные измерения дали общую картину эффектов в исследованных образцах, а импульсные — возможность предотвратить преждевременный тепловой пробой КДР, почти на порядок увеличить предельную плотность токов в них (с  $J \approx 10^5$  А/см<sup>2</sup> в стационарном режиме до  $J \approx 10^6$  А/см<sup>2</sup> в импульсном) и наблюдать кинетику процессов, которые в них происходят.

Как и в стационарном режиме питания [2], импульсный ток разогревал рабочий слой кремниевых резисторов, изготовленных по технологии “кремний на диэлектрической изоляции” (КНДИ) [3], до температур, при которых в них термически генерируется электронно-дырочная плазма. С увеличением тока наблюдалось возрастание скачком напряжения на резисторе и появление при этом различного рода свечения. В резисторах с определенными типоразмерами свечение наблюдалось в виде полосы [2], расположенной нормально к направлению его протекания.

Наиболее вероятно, что эти эффекты связаны с формированием в кремнии специфического домена высокого поля, так называемого термического градиентно-дрейфового (ТГД) домена [4]. Дальнейшее возрастание тока сопровождалось появлением вместо домена шнура тока и, в конце концов, катастрофическим разрушением структуры. Измерения в импульсном режиме позволили оценить времена образования ТГД-домена, шнура тока и других переходных процессов в КДР.

Цель данной работы — подробное изучение переходных процессов и характеристик в кремниевых резисторах при действии неразрушающих одиночных прямоугольных импульсов тока с плотностью до  $10^6$  А/см<sup>2</sup> с одновременным наблюдением свечения поверхности КДР в микроскоп.

### Экспериментальные образцы и методика исследований

На рис. 1 схематически изображены исследуемые КДР — кремниевые  $n^+n-n^+$ -резисторы с электрическими контактами из алюминия (Al) к  $n^+$ -областям. Они расположены в “карманах”, которые отделены слоем SiO<sub>2</sub> толщиной  $\approx 2$  мкм от подложки из поликремния толщиной 300 мкм. “Карманы” имеют разную глубину  $h_1$  (от 2,8 мкм до 10,5 мкм).

Резисторы изготовлены из монокристаллического  $n$ -кремния,  $n^+$ -области получены ионным легированием  $n$ -кремния фосфором до концентрации фосфора  $P \approx 10^{21}$  см<sup>-3</sup> с его дальнейшей термической разгонкой на глубину  $h \approx 5$  мкм. В зависимости от глубины  $h_1$  “кармана”  $n^+$ -область имеет такую же глубину, как и “карман” ( $h_1/h=1$ ), или меньшую ( $h_1/h>1$ ).

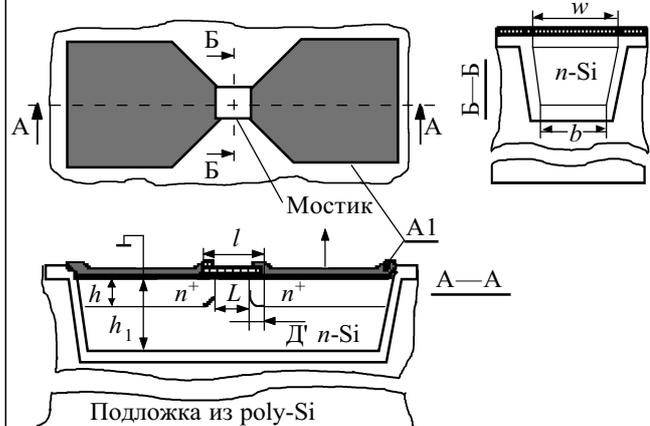


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых КДР (сечение по Б—Б для наглядности увеличено)

Считается, что ток в КДР в первую очередь разогревает ту его часть из  $n$ -кремния, которая расположена между  $n^+$ -областями и которую дальше будем называть “мостиком”. Ясно, что омическое сопротивление “мостика” зависит от его размеров  $h_1$ ,  $L$ ,  $b$  и  $w$  (см. рис. 1) и, в основном, определяет сопротивление КДР  $R$ . В исследованных резисторах величина  $R$  лежала в интервале от единиц до десятков Ом.

КДР отличались между собой главным образом двумя конструктивными параметрами. Первый — это величины  $h_1$  и  $h$ , которые в разных образцах были разные, но для которых всегда выполнялось соотношение  $h_1/h=1$  или  $h_1/h>1$ ; второй — так называемая фотолитографическая длина “мостика”  $l$ . В разных образцах  $l=8,0...13,4$  мкм. Заметим, что при разгонке фосфор “подлегирует” кремний под краем окисла возле поверхности [5], вследствие чего длина “мостика”  $L$  между  $n^+$ -областями всегда меньше  $l$  на длину “подлегирувания”  $2\Delta l$ .

Поперечное сечение “мостика” имеет вид трапеции, у которой размер нижней основы  $b=4,0$  мкм фиксированный, а величина верхней основы  $w$  определяется глубиной “кармана”  $h_1$  и изменяется в интервале  $w=8...18$  мкм. В структурах разных типов размеры контактных площадок из Al немного отличались, но в среднем их длина составляла 200 мкм, а ширина — 150 мкм.

Импульсные вольт-амперные характеристики (ВАХ) КДР снимали в режиме генератора тока. Одновременно с электрическими измерениями поверхность КДР наблюдали в оптический микроскоп.

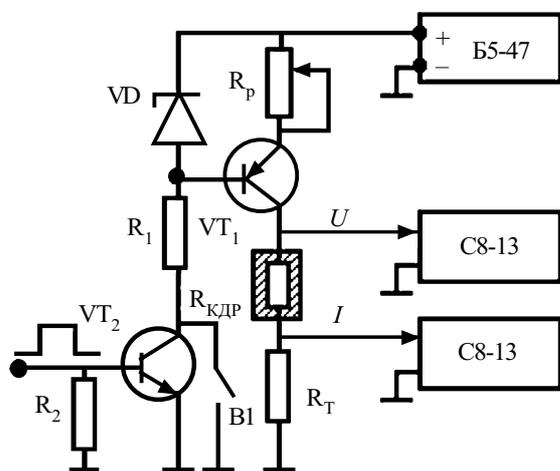


Рис. 2. Схема измерений

Схема измерений показана на рис. 2. Генератор тока собран на транзисторе VT1 по стандартной схеме и работает следующим образом. Транзистор VT1 стабилизирует ток  $I$ , протекающий через КДР. Резистор  $R_p$  задает этот ток. С  $R_t$  снимается сигнал, пропорциональный току  $I$ , при этом выполняется условие  $R_t \ll R_{KDR}$ . Резистор  $R_1$ , VD стабилизируют рабочую точку транзистора VT1. Транзистор VT2 обеспечивает включение генератора тока в импульсном режиме. При замыкании переключателя B1 генератор тока начинает работать в стационарном режиме.

Обсуждение результатов

Осциллограммы падения напряжения  $V(t)$  на КДР и их ВАХ.

При измерениях импульсных ВАХ КДР питали одиночными прямоугольными импульсами тока  $I$  и регистрировали изменение на них напряжения  $V(t)$  во времени  $t$ . На рис. 3 приведены типичные осциллограммы  $V(t)$  при разных  $I$ . Они характерны для всех КДР (далее — группа 1, рис. 3, а), кроме КДР с наибольшими значениями глубины  $h_1=10,5$  мкм ( $h_1/h=2,1$ ) и длины  $l=l_{max}=13,4$  мкм (далее — группа 2, рис. 3, б).

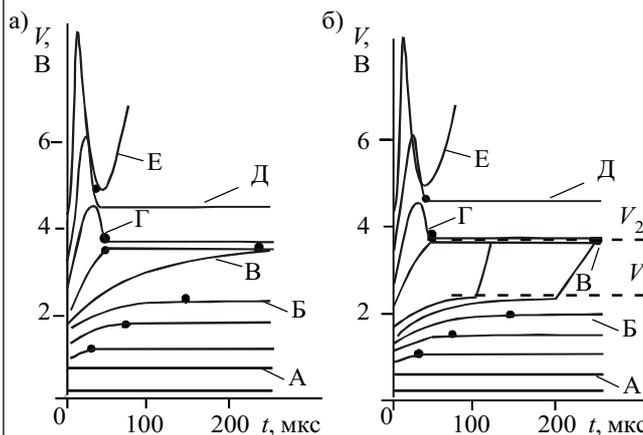


Рис. 3. Осциллограммы напряжения  $V(t)$  при разных значениях тока  $I(t)$ , полученные для разных групп образцов: а — группа 1; б — группа 2

Общими свойствами всех КДР являются:

1. Прямоугольная форма импульсов напряжения  $V(t)$  при небольших токах  $I$  (осц. А на рис. 3, а, б).
2. Появление переходных участков на зависимостях  $V(t)$  при больших токах  $I$  (после осц. А на рис. 3, а, б) и выход  $V(t)$  со временем на отмеченные точки ( $\bullet$ ) значения  $V_{ст}$ , которые совпадают со стационарными значениями. Отметим, что сами переходные участки  $V(t)$  ведут себя по-разному в КДР из 1-й и 2-й групп.

Для КДР группы 1 характерно наличие пороговой величины тока, небольшое превышение которой приводит к росту  $V(t)$  на структуре (сравни осц. Б и В на рис. 3, а) и, одновременно, к возникновению в ней светящейся поперечной к направлению тока полосы (схематически изображена на рис. 4, Г). Увеличение  $I$  приводит к появлению пика на осц.  $V(t)$  и в конце концов завершается образованием токового шнура между  $n^+$ -областями и разрушением КДР.

У КДР группы 2 также существует пороговая величина тока, небольшое превышение которой вызывает значительный скачок  $V(t)$  с величины  $V_1$  до  $V_2$  в течение действия одного импульса тока (осц. В, рис. 3, б). С ростом  $I$  этот скачок сдвигается к началу импульса, причем его длительность уменьшается, а величины  $V_1$  и  $V_2$  не меняются. Отметим, что скачку  $V$  на КДР сопутствует появление в структуре двух светящихся пятен, расположенных посередине  $n$ -области у ее боковых сторон (рис. 4, Г'). Дальнейший рост тока, как и в первом случае, сопровождается появлением пика на

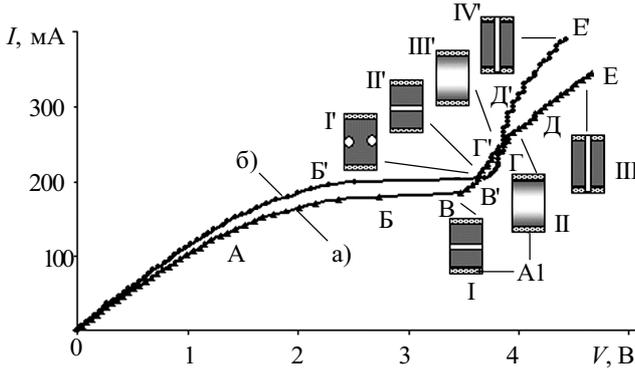


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики резисторов (рядом с ВАХ — распределение излучения с резистора по его поверхности):  
 а — группа 1; б — группа 2

зависимостях  $V(t)$  (смотри, например, осц. Г, Д на рис. 3, а, б), образованием токового шнура и разрушением КДР (осц. Е на рис. 3, а, б).

Импульсные ВАХ КДР показаны на рис. 4. Сопоставим форму осциллограмм напряжения на разных участках ВАХ. Участок 0А обеих ВАХ (рис. 4, а, б) соответствует прямоугольной форме импульсов  $V(t)$  (осц. А, рис. 3, а, б), участок АВ — нарастанию напряжения с течением времени после начала импульса и выхода на стационарное значение (осц. Б, рис. 3, а, б). На этом участке, как и на 0А, наблюдалось почти пропорциональное возрастание напряжения с увеличением тока. После достижения некоего значения тока (точка Б на рис. 4, а и осц. Б, рис. 3, а) дальнейшее небольшое его возрастание приводило к увеличению (прыжком) напряжения на КДР (смотри осц. В, рис. 3, а и участок БВ, рис. 4, а) и сокращению после этого почти до нуля времени переходного процесса с возрастанием величины  $I$ .

Дальнейшее увеличение тока  $I$  сопровождалось появлением в начале осциллограммы  $V(t)$  пика (осц. Г, рис. 3, а). Падение напряжения на КДР при дальнейшем увеличении  $I$  начинало возрастать пропорционально току (осц. Д на рис. 3, а и участок ГДЕ, рис. 4, а). В конце концов, после начального пика (осц. Е, рис. 3, а) напряжение на КДР резко возрастало и структура разрушалась.

Подобный сценарий изменения  $V(t)$  во времени при разных  $I$  характерен для всех КДР — за исключением тех, в которых  $h_1 = h_{1\max}$  и  $l = l_{\max}$  (группа 2). Заметим, что при измерениях стационарных ВАХ именно на этих КДР наблюдались ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью, что существенно выделяет их среди всех других. Характерным отличием, как уже было сказано, является наличие пороговой величины тока, превышение которой вызывает значительный скачок напряжения  $V(t)$  (осц. В, рис. 3, б и участок Б'В', ВАХ рис. 4, б), и сокращение почти до нуля времени переходного процесса с возрастанием величины  $I$ . Такое ускорение переходного процесса происходило при одинаковом стационарном значении  $V_1$  и  $V_2$ . Дальнейшее увеличение тока  $I$  сопровождалось появлением в начале осциллограммы  $V(t)$  пика (осц. Г, рис. 3, б).

Величина напряжения после выхода на стационарное значение изменялась ступеньками: в некотором диапазоне токов напряжение  $V$  не менялось, затем, при увеличении  $I$ , падение напряжения скачком возросло и вновь стабилизировалось, и т. д. Таких участков стабильного напряжения могло быть несколько (участок В'Д', рис. 4, б). На ВАХ они расположены в диапазоне токов  $220 \text{ mA} < I < 330 \text{ mA}$ . На этих участках дифференциальное сопротивление резисторов периодически осциллировало от нуля до расчетной величины. При дальнейшем увеличении тока ( $I > 330 \text{ mA}$ ) падение напряжения возрастало пропорционально  $I$  (участок Д'Е', рис. 4, б). На всех других участках характер ВАХ для обеих групп структур совпадает.

*Определение длины “мостика” КДР.*

Выше отмечалось, что вследствие “подлегирирования” действительная длина “мостика”  $L$  меньше его фотолитографической длины  $l$ . Но именно величина  $L$  определяет электрические параметры КДР, например, крутизну начального участка ВАХ. Поэтому прежде всего мы определили величину  $L$  в разных КДР, для чего воспользовались стандартной методикой [5]. В соответствии с ней сначала находят глубину “подлегирирования”  $\Delta l$ , а после этого —  $L$ . В нашем случае длину  $\Delta l$  можно найти из сравнения характеристик двух образцов с  $h_1/h \approx 1$  и разными значениями  $l_1$  и  $l_2$ , именно которые и определяют различие в сопротивлениях этих образцов  $R_1$  и  $R_2$ .

Чтобы найти  $\Delta l$ , запишем соотношение

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{l_1 - 2\Delta l}{l_2 - 2\Delta l}, \tag{1}$$

где  $R_1, R_2$  — сопротивления первого и второго КДР;  
 $L_1, L_2$  — действительная длина “мостиков” в этих КДР;  
 $l_1, l_2$  — фотолитографические длины “мостиков”;  
 $\Delta l$  — глубина “подлегирирования” под границу окисла, которая одинакова во всех КДР.

Решение (1) относительно  $\Delta l$  дает:

$$\Delta l = \frac{R_1 l_2 - R_2 l_1}{2(R_2 - R_1)}. \tag{2}$$

Для нахождения величины  $\Delta l$  использованы КДР с  $h_1/h \approx 1$ , в которых  $h = 4,9 \text{ мкм}$ ,  $l_1 = 13,4 \text{ мкм}$ ,  $l_2 = 11,2 \text{ мкм}$ . Определенные из начальных участков ВАХ этих КДР сопротивления равны:  $R_1 \approx 15 \text{ Ом}$ ,  $R_2 \approx 11 \text{ Ом}$ . Подстановкой в (2) значений  $l_1, l_2, R_1$  и  $R_2$  нашли, что  $\Delta l = 2,8 \text{ мкм}$ , а длины “мостиков” в разных структурах составляют 2,4, 5,6 и 8,0 мкм.

*Определение концентрации электронов в n-кремнии.*

Знание длины  $l$  дало возможность определить концентрацию электронов в  $n$ -области “мостика”. Необходимость такого определения вызвана двумя причинами. Во-первых, при изготовлении КДР применяют высокотемпературные процессы, вследствие чего исходная и конечная концентрации свободных электронов в “мостике” могут отличаться. Во-вторых, нам не была точно известна исходная концентрация электронов в  $n$ -кремнии. Поэтому в исследуемых КДР величину концентрации  $n$  определяли следующим образом.

Сопротивление  $R$  “мостиков” на начальных (линейных) участках ВАХ, где выполняется закон Ома, определяется как

$$R = U/I. \quad (3)$$

С другой стороны, его можно выразить через удельное сопротивление  $\rho$   $n$ -кремния и параметры “мостика” в виде

$$R = \rho \frac{2l}{(w+b)h_1}, \quad (4)$$

где

$$\rho = 1/en\mu; \quad (5)$$

$e$  — заряд электрона;

$n, \mu$  — концентрация и подвижность электронов.

Комбинируя выражения (3)—(5), легко показать, что

$$n = \frac{2LI}{e h_1 (w+b)\mu V}. \quad (6)$$

Взяв на линейных участках ВАХ значения  $I$  и  $V$  и считая, что подвижность электронов  $\mu$  в  $n$ -кремнии равняется своему объемному значению, нашли, что в “мостике”  $n \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

*Протекание тока в КДР и связанные с ним процессы.*

Начальный линейный участок ВАХ КДР (рис. 4, б) свидетельствует о соблюдении на нем закона Ома. Переход от линейного к сублинейному участку на ВАХ с возрастанием тока начинается, когда напряженность электрического поля  $E$  в кремнии превышает значение  $E \approx 3 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ . Это значение почти совпадает с величиной  $E \approx 5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ , при котором скорость электронов в кремнии начинает стремиться к насыщению [6, с. 54]. Поэтому сублинейный ход ВАХ можно связать именно с насыщением скорости электронов.

При дальнейшем увеличении тока наблюдается прыжок напряжения, который определяет участок БВ на ВАХ (см. рис. 4, а и осц. В, рис. 3, а). Этот прыжок, следует думать, вызван образованием области высокого поля. Возможно, что это так называемый ТГД-домен [4], т. к. в исследованных образцах выполняются необходимые для его образования требования.

Именно с процессом образования такого домена можно связать постепенное увеличение напряжения на КДР после начала действия импульса тока  $I$  (осц. В, рис. 3, а). Ясно, что время образования ТГД-домена должно уменьшаться с возрастанием величины тока, которое наблюдается в эксперименте (осц. В, Г, рис. 3, а).

После образования домен существует до окончания импульса тока. Сильное поле в домене “разогревает” электроны и дырки, рекомбинация которых сопровождается излучением в видимом участке спектра. При дальнейшем увеличении тока  $I$  ТГД-домен сначала образуется, но из-за перегрева структуры потом разрушается. Причины его разрушения описаны в [7].

### Выводы

Проведенные исследования характеристик кремниевых диффузионных резисторов, созданных по технологии “кремний на диэлектрической изоляции”, при протекании сквозь них токов экстремально большой плотности, вплоть до их разрушения, позволили:

- обнаружить участки ВАХ, где проявляются осцилляции дифференциального сопротивления;
- определить параметры кремниевых диффузионных резисторов, необходимые для расчета их эксплуатационных характеристик;
- определить глубину подлегирования, необходимую для определения длины резистора, и концентрацию носителей заряда в нем.

Наблюдаемые эффекты объяснены возникновением термического градиентно-дрейфового домена при больших плотностях тока, протекающего через резистор.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы специалистами, работающими в области проектирования и конструирования электронных средств и занимающимися материалами микроэлектроники.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коноваленко Л. Д., Макордей Ф. В., Мазуренко В. С., Андреев В. И. Полупроводниковые энерговыделяющие элементы // Фотоэлектроника.— 2003.— Вып. 12.— С. 21—27.
2. Коноваленко Л. Д., Кушніренко В. В., Нінідзе Г. К., Павлюк С. П. Фізичні ефекти в кремнієвих дифузійних резисторах при протіканні великих струмів // Вісник КНУ. Сер. Ф-МН.— 2004.— № 1.— С. 325—334.
3. Колобов Н. А. Основы технологии электронных приборов.— М.: Высшая школа, 1980.
4. Добровольський В. М., Павлюк С. П. Термічний градієнтно-дрейфовий домен в електронно-дірковій плазмі напівпровідників // ФТН.— 1981.— Т. 15, вип. 1.— С. 120—129.
5. Интегральные схемы на МДП-приборах.— М.: Мир, 1975.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1.— М.: Мир, 1984.
7. Павлюк С. П. Механізм переміщення та зникнення термічного градієнтно-дрейфового домену в напівпровідниках // Вісник КНУ. Сер. Ф-МН.— 2001.— № 1.— С. 400—401.

### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Игуменов Д. В., Костюнина Г. П. Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 392 с., ил.**

В книге изложены основы построения современных полупроводниковых аналоговых и цифровых устройств. Приведены сведения о физических явлениях в полупроводниковых элементах, рассмотрены различные диоды, биполярные и полевые транзисторы. Описаны особенности интегральных схем. Основное внимание уделяется рассмотрению разнообразных транзисторных и интегральных устройств непрерывного и импульсного действия.

Для студентов вузов; будет полезна специалистам смежных с электроникой областей, которые занимаются вопросами, требующими от них дополнительных знаний по электронике.

