

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. Лашкарева, 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 микроэлектронных 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/см² в стационарном режиме до $J \approx 10^6$ А/см² 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/см² 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 SiO₂ толщиной ≈ 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⁻³ 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 ($h_1/h>1$).

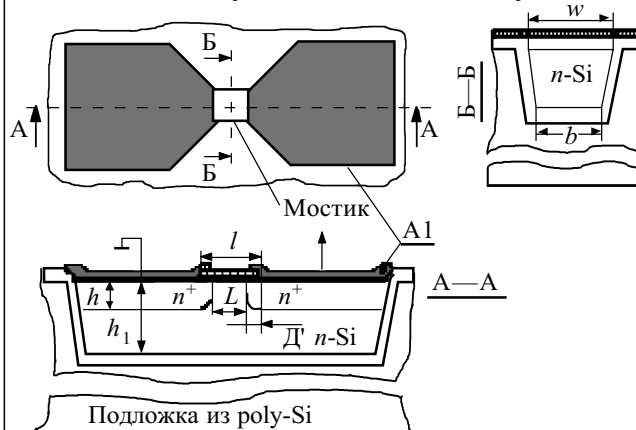


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых КДР (сечение по Б—Б для наглядности увеличено)

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 $L=8,0\ldots 13,4$ 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 $w=8\ldots 18$ 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.

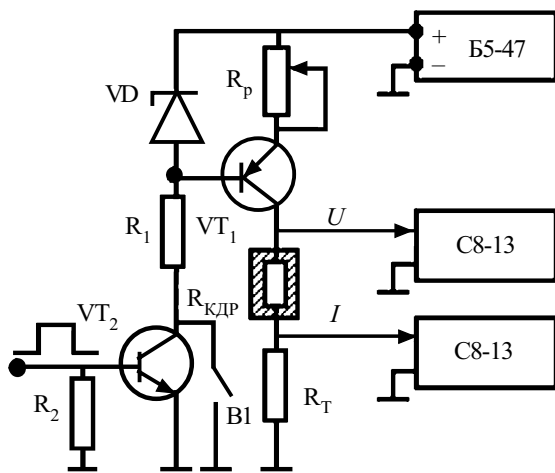


Рис. 2. Схема измерений

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 $R_T \ll R_{KDP}$. 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).

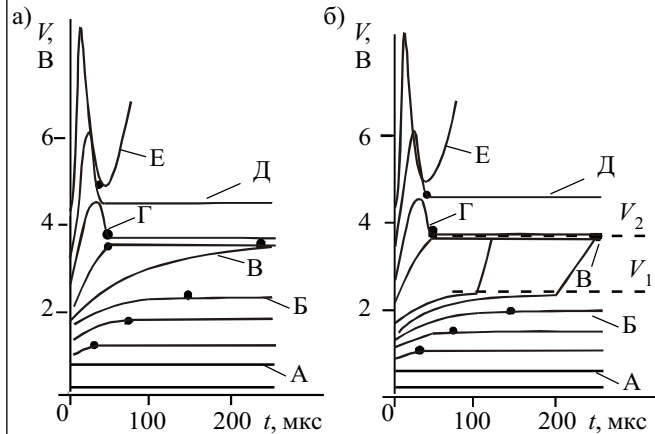


Рис. 3. Осциллограммы напряжения $V(t)$ при разных значениях тока $I(t)$, полученные для разных групп образцов: а — группа 1; б — группа 2

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 (•) 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

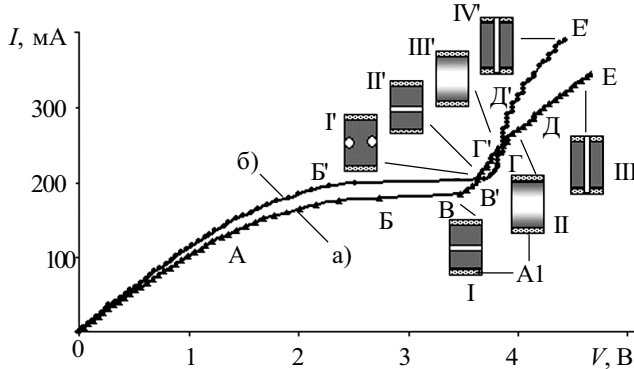


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики резисторов (рядом с ВАХ — распределение излучения с резистора по его поверхности):
а — группа 1; б — группа 2

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 возрастало 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 $220 \text{ мА} < I < 330 \text{ мА}$. На этих участках дифференциальное сопротивление резисторов периодически осциллировало от нуля до расчетной величины. При дальнейшем увеличении тока ($I > 330 \text{ мА}$) 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 “подлегиживания” 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 “подлегиживания” Δl , а после этого — L . В нашем случае длину Δl 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 Δl , запишем соотношение

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

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”;
 Δl — глубина “подлегиживания” под границу окисла, которая одинакова во всех КДР.

Решение (1) относительно Δl дает:

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

Для нахождения величины Δl 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 ρ 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, μ — 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 μ 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 А. 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.

