

Рис. 10. Инерциальный датчик ускорения

Ключевые моменты совершенствования LIGA-процесса: разрешение деталей микроструктур с субмикронным допуском, достижение субмикронного допуска на длине более 10 мм, сокращение продолжительности облучения за счет применения более чувствительных резистов и, следовательно, снижение временных затрат



Рис. 11. Многоконтактный электроразъем

на рентгеновскую литографию с часов до минут, выработка промышленных стандартов на материалы, размеры, оборудование и надежность.

В Курчатовском источнике синхротронного излучения при поддержке Института микротехнологии (Майнц, Германия) проведены эксперименты по глубокой рентгеновской литографии, которые показали, что предварительный расчет необходимой дозы и продолжительности облучения подтвердился полной проработкой слоя резиста на всю толщину, а спектр излучения источника отлично обеспечивает точность воспроизведения рисунка маски и гладкие вертикальные стенки микроструктуры.

Список литературы

1. Tolfree D.V.L. Microfabrication using synchrotron radiation // Rep. Prog. Phys., 1998, 61. P. 313–351.
2. Ehrfeld W., Lehr H. Deep X-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics // Radiat. Phys. Chem. 1995, vol. 45. No. 3. P. 349–365.
3. Handbook of Microlithography // Micromachining and Microfabrication. Ed. P. Rai-Choudhury, 1996.
4. Artemiev A.N., Koliashnikov V.A., Peredkov S.S., Rakhimbabaev T.Y., Stankevitch V.G. et al. Deep X-ray Lithography beamline at the KSRS: first results // Nucl. Instrum. & Meth. In Phys. Res., A405 (1998). P. 496–499.

УДК 621.3

Ю.Ф. Адамов, д-р техн. наук проф.*, Н.В. Корнеев, В.Г. Мокеров, д-р техн. наук проф., чл.-кор. РАН*, В.К. Неволин, д-р физ.-мат. наук проф., Московский государственный институт электронной техники (Технический университет)
Тел. (095) 532–89–57, факс (095) 530–22–33, e-mail vkn@miec.ru
*Институт радиотехники и электроники РАН

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНЫХ 2D-НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Сочетанием методов традиционной планарной технологии с зондовыми методами окисления металлических проводящих дорожек на диэлектрических подложках в сканирующем атомно-силовом микроскопе созданы двухэлектродные планарные элементы с 2D-наноразмерными сужениями. Такие структуры должны проявлять размерные эффекты в проводимости, в том числе квантовые эффекты в нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ). Методы зондового формирования позволяют создать двухэлектродные планарные элементы с множеством нелинейных ВАХ, имеющих различные функциональные назначения.

Методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии возможно формирование проводящих структур, у которых один или два характерных размера имеют нанометровые значения. В частности, методами сканирующей туннельной микроскопии были созданы вертикальные квазиодномерные микроконтакты, на основе которых были изготовлены макеты датчиков рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока, макеты перестраиваемых нанодиодов-нанодинисторов, обладающие уникальными свойствами [1]. В основе физики электронных явлений в таких структурах лежат размерные эффекты, которые существенны особенно тогда, когда поперечные размеры микроконтактов из металлов меньше 10 нм. В этом случае возможно квантование поперечной энергии носителей тока и проявление квантовых свойств микроконтактов при комнатных температурах. Двухэлектродные элементы на основе таких квазиодномерных микроконтактов (квантовых проводов) могут проявлять электрические свойства, характерные для планарных многослойных структур [2]. Для этого необходимо изменять диаметр провода и радиус кривизны подводных электродов. Кроме того квантовый микроконтакт может управляться инфракрасным светом с длинами волн до 20 мкм, может являться и источником этого света, а также управляться электрическим полем (транзисторный эффект).

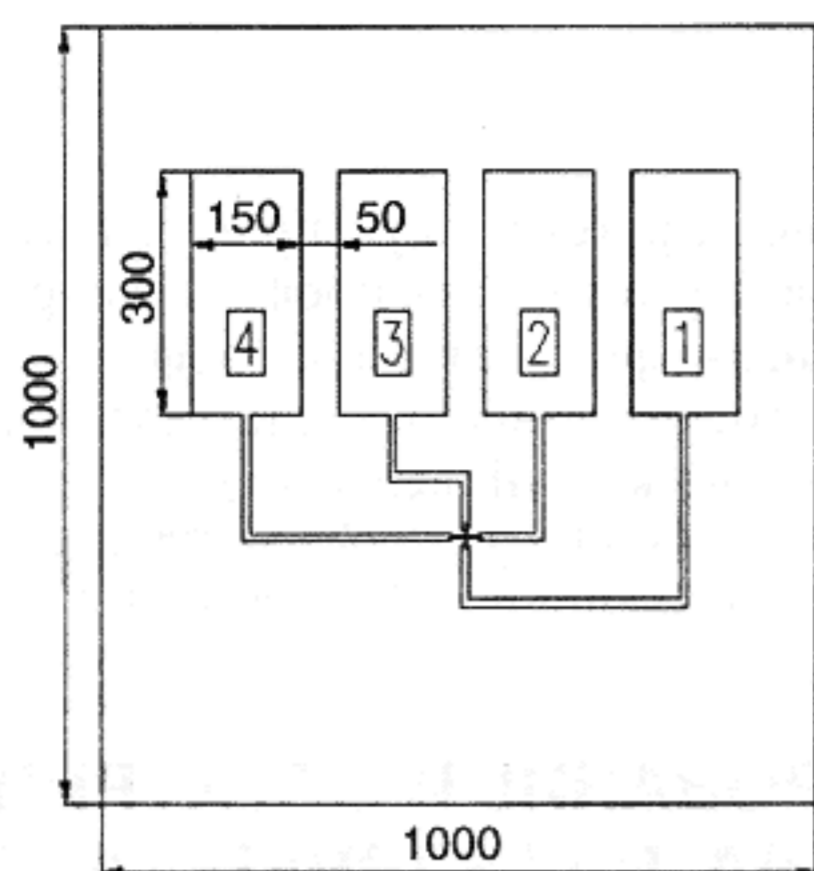
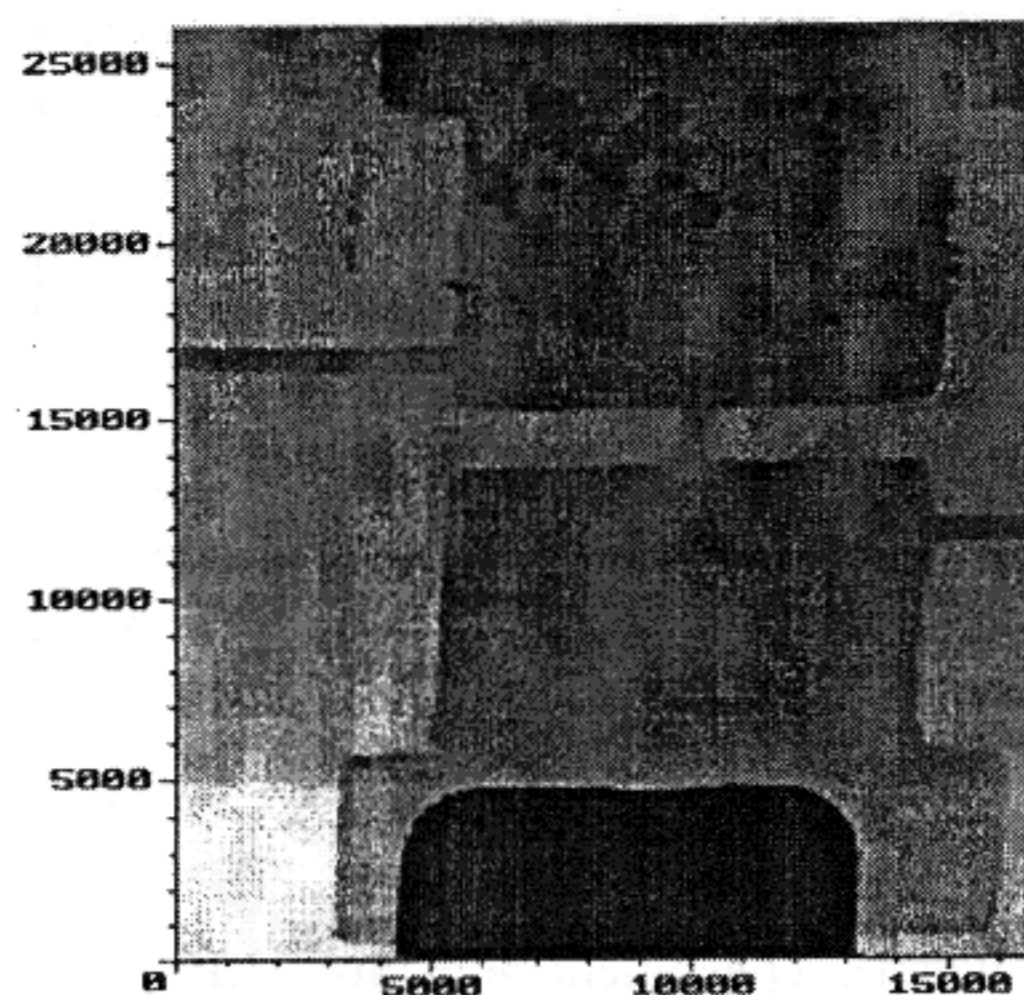


Рис. 1. Геометрия и топология планарных элементов на кристалле



Однако вертикальные квазиодномерные микроконтакты, когда контакт образуется между проводящей подложкой и вертикально расположенным над ним зондом, обладают существенным недостатком – высокой чувствительностью к температуре окружающей среды. Дело в том, что зонд относительно подложки фиксируется в диэлектрической матрице, например, из эпоксидной смолы, у которой коэффициент линейного расширения достаточно высок. Для преодоления высокой термочувствительности вертикальных квантовых микроконтактов и развития наиболее производительных планарных методов технологии является весьма актуальным создание планарных 2D-наноразмерных структур из проводящих материалов на диэлектрических подложках. Проводящие дорожки на диэлектрических подложках могут иметь поперечные размеры, характеризующиеся практически всегда двумя величинами. Двухстадийному процессу формирования и исследованию электрических свойств планарных 2D-наноразмерных структур посвящена эта статья.

Для проявления квантовых свойств проводящих дорожек при комнатных температурах на диэлектрических подложках прежде всего необходимо, чтобы любой из поперечных размеров a_1 , a_2 удовлетворял неравенству [2]

$$a_{1,2} \leq \frac{\pi \eta^2 k_f}{30 m k T},$$

где k_f – волновое число Ферми; m – масса носителей тока; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Выполнение этих неравенств необходимо для создания многомодовых Q2D-квантовых проводов, когда несколько уровней поперечного квантования энергии лежат ниже уровня Ферми и участвуют в переносе носителей тока. Для наблюдения квантовых эффектов в квазиодномерном канале необходимо также, чтобы длина когерентности носителей тока превышала длину провода. В этом случае может реализоваться баллистический квантовый "транспорт". Для преодоления дифракции носителей тока на границах перехода от макроэлектродов к проводящему каналу важна плав-

ность перехода электродов – "берегов" – в квантовый канал. Качество поверхности квантовых проводов является также принципиальным для наблюдения квантовых эффектов, шероховатость поверхности приводит к размыванию уровней поперечного квантования энергии. Поверхностные энергетические состояния, возникающие на границе между диэлектрической подложкой и квантовым проводом, также могут оказывать существенное влияние на "транспорт" носителей тока в канале. Все эти факторы усугубляют возможность наблюдения квантовых свойств проводимости при комнатных температурах.

Рассмотрим последовательно двухстадийную технологию изготовления макетов планарных двухэлектродных устройств с квазиодномерными проводниками.

На рис. 1 представлены геометрия планарных элементов на одном кристалле размерами 1×1 мм и топография титановой дорожки с подводщими электродами. На одном из подводщих титановых траверсов написана аббревиатура названия журнала (МТ) методом анодирования (см. ниже). Основной титановый проводник выполнен в виде дорожки, ширина которой составляет 0,5 мкм, толщина 50 нм. Потенциальные титановые проводники позволяют выполнять дополнительные электрические измерения. В качестве исходной несущей подложки были выбраны изолирующие GaAs-пластины диаметром 32 мм. В качестве материала проводников, на которых в последующем формируются участки с квазиодномерной проводимостью, был выбран титан. Титан достаточно просто окисляется в электрическом поле, что важно для применения зондовой технологии при формировании квазиодномерных перемычек. В качестве материала подводщих электродов было выбрано золото. Золотые контактные площадки имеют размеры 300×150 мкм, что позволяет достаточно просто устанавливать внешние зонды для проведения измерений. Весь цикл технологических операций по созданию кристаллов с планарными титановыми проводниками и золотыми электродами был выполнен в Институте радиотехники и электротехники РАН (ИРЭ РАН) в отделе № 29. Для последующего проведения зондовых технологических операций и

измерений пластины разрезались на кристаллы с размерами $1,0 \times 1,0$ мм.

Явление анодного окисления пленок, которое далее будем называть *анодизацией* (anodization), известно давно и достаточно изучено [3]. Успехи японских исследователей по анодизации титановых пленок с помощью зонда туннельного микроскопа [4] способствовали тому, что нами были выбраны именно титановые планарные проводники для проведения на следующей стадии техпроцесса зондовой анодизации. При анодизации титановых пленок электролитом между зондом и подложкой служит адсорбат паров воды. В работе [4] при напряжении между зондом и титановой пленкой 5 В (положительный потенциал подается на пленку) и силе тока 1 нА происходит окисление пленки на глубину 4 нм. Скорость движения зонда при анодизации 0,01 мкм/с, ширина окисленной дорожки 80 нм.

Масс-анализ показал, что окислы титана содержат следы углерода, их удельное сопротивление составляет $\sim 10^3$ Ом·см. Эти параметры диэлектрических пленок на основе титана являются вполне удовлетворительными для "вырезания" квазиодномерных проводников из исходных проводящих дорожек зондовым методом.

В результате окисления титанового проводника получается перемишка между двумя макроэлектродами. При характерных размерах перемишки менее 7 нм должно осуществляться полное поперечное квантование энергии носителей тока, и многообразие вольт-амперных характеристик (ВАХ) будет зависеть от геометрической кривизны подводных электродов [2]. Проблемы качества поверхности квазиодномерных проводов предполагается решать за счет предельного уменьшения поперечных размеров, что должно приводить к увеличению "резкости" поперечного квантования.

На рис. 2 в качестве примера изображен фрагмент дорожки в увеличенном масштабе. Можно видеть несовершенство геометрии электродов в нанометровых масштабах, что в конечном счете ведет к неоднозначности получаемых характеристик планарных элементов.

На рис. 3 в качестве примера приведено изображение центральной дорожки после окисления. Можно видеть, что образуются выступы из окисленного титана, которые имеют неправильную форму. На титановых дорожках, имеющих аморфную структуру (однородные пленки больших размеров), как правило, области окисления имеют правильную форму. Многократным повторением циклов окисления можно было добиться полного прекращения проводимости дорожки. Таким образом, метод зондового окисления позволяет изменять проводимость титановых дорожек в относительно больших пределах.

Основными результатами, полученными при исследовании двухэлектродных элементов с титановыми проводниками, являются ВАХ. На рис. 4 показана исходная ВАХ центральной дорожки с электродами (кривая 1). Можно видеть, что имеет место линейный омический контакт с полным сопротивлением цепи 450–1000 Ом. Для анодирования применялись, как правило, прямоугольные импульсы напряжения с различными амплитудой и скважностью. На рис. 4

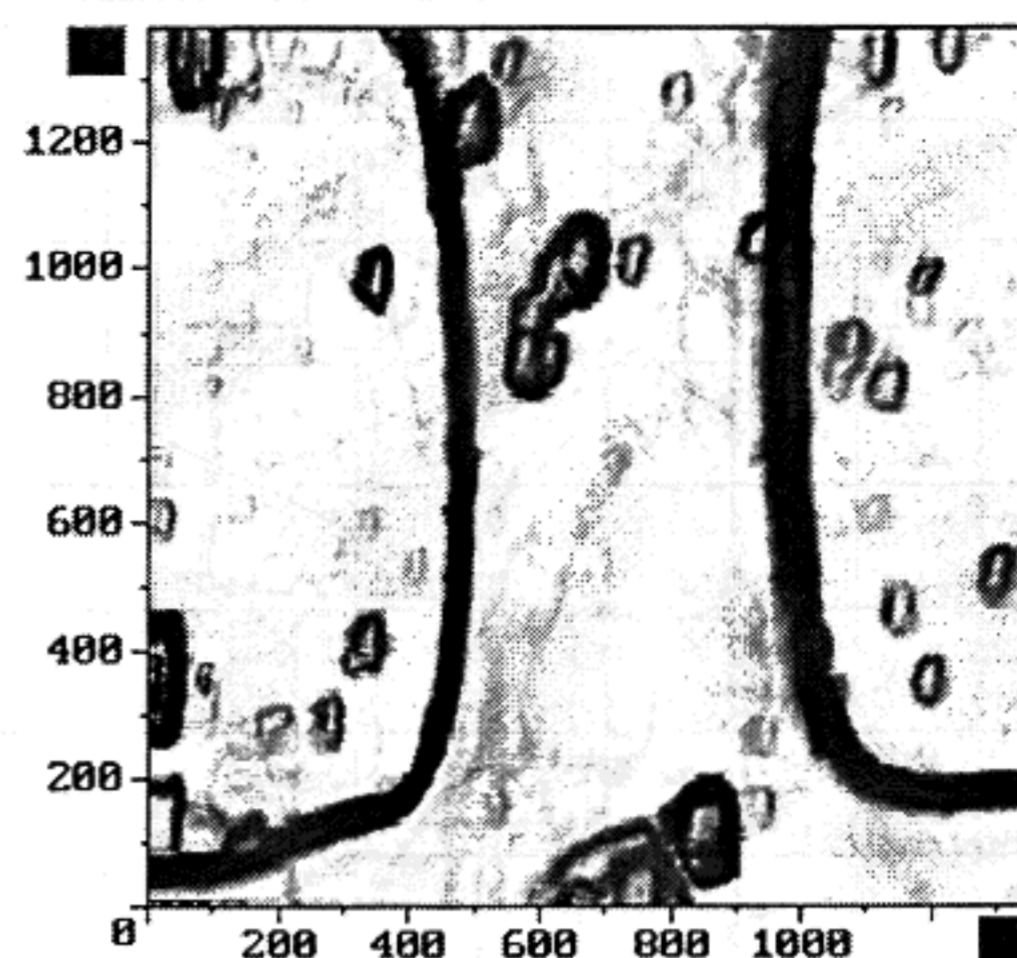


Рис. 2. Топография фрагмента центральной титановой дорожки

(кривые 2–4) показаны ВАХ при различных циклах окисления. Можно видеть, что наблюдаются так называемые S-образные ВАХ, с помощью которых, в частности, можно реализовать генераторные режимы работы нанодиодов.

Одной из проблем при создании планарных квантовых проводов является *качество границ раздела*. При формировании вертикальных проводов в сканирующем туннельном микроскопе качество границы между проводом и эпоксидной матрицей определялось процессами самоформирования структуры между зондом и проводящей подложкой. Экспериментальные результаты показывали, что качество границы высокое, поскольку квантовые эффекты наблюдались при комнатных температурах. В случае планарных проводников границы раздела возникают в разных технологических операциях, что создает дополнительные проблемы. В

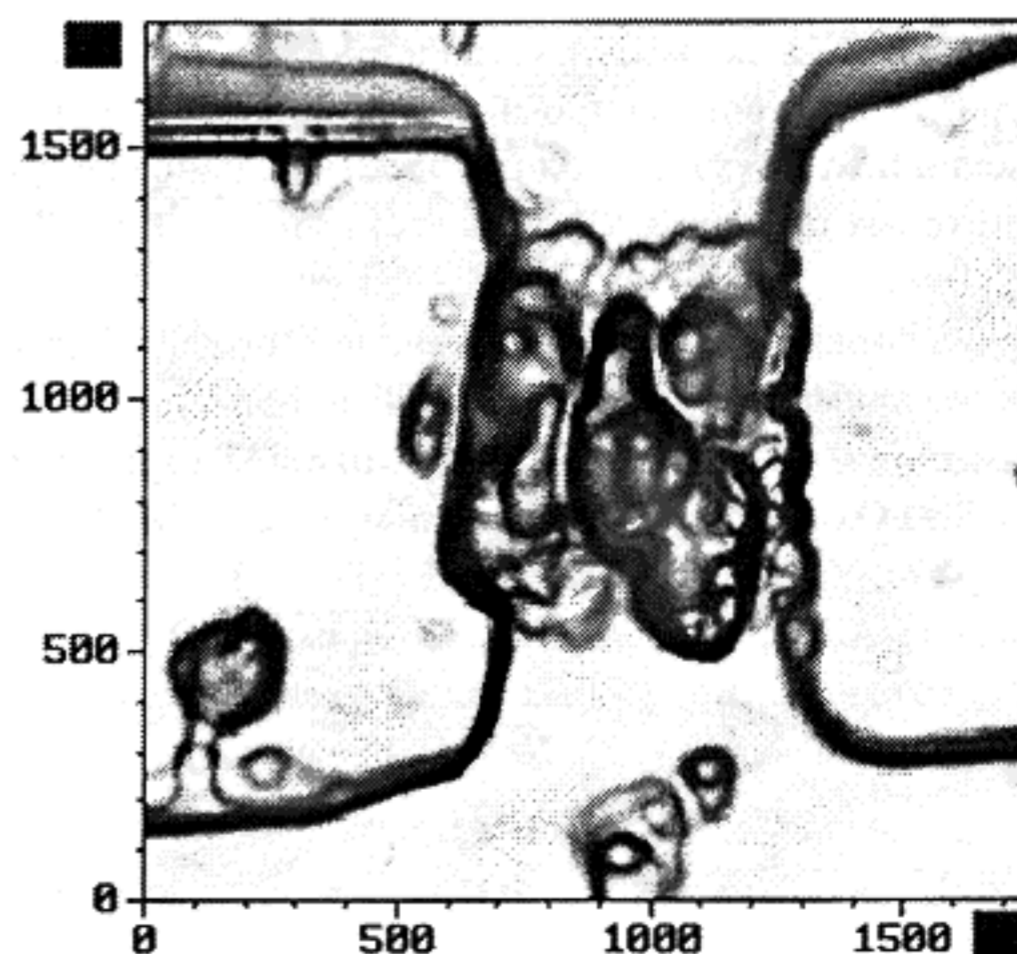


Рис. 3. Топография фрагмента центральной титановой дорожки после окисления

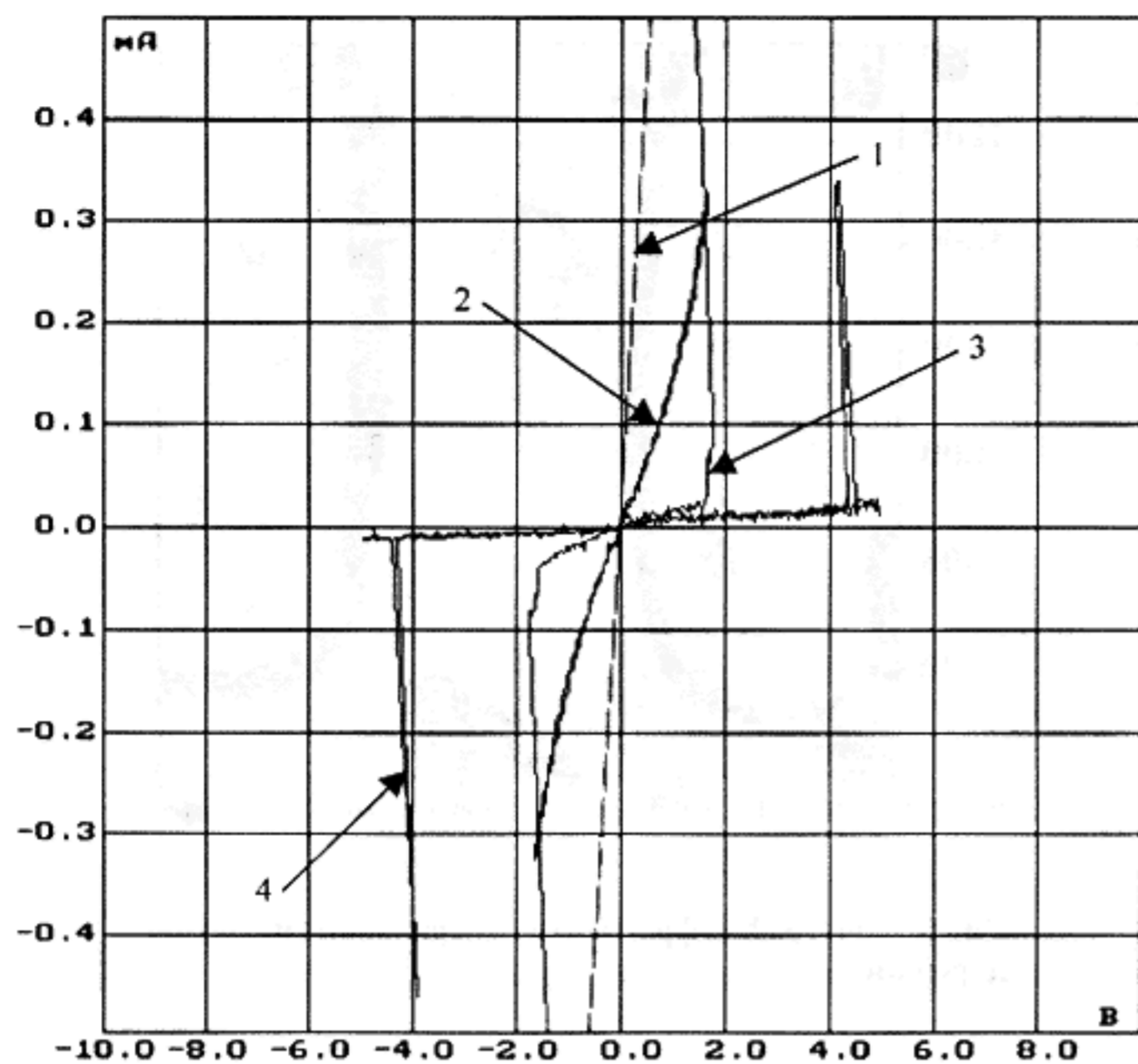


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) планарных двухэлектродных элементов: 1 – ВАХ элемента до окисления; 2, 3, 4 – ВАХ элементов после нескольких стадий окисления

связи с этим являются актуальными идеи самоформирования планарных квантовых проводов [5].

Таким образом, созданы лабораторные макеты планарных двухэлектродных элементов с 2D-наноразмерными структурами, проявляющих многообразие ВАХ и имеющих в связи с этим разнообразное функциональное назначение. Ясно, что необходима дальнейшая отработка всех стадий технологии изготовления планарных структур для более явного проявления квантовых свойств проводимости при комнатных температурах.

Список литературы

1. Неволин В.К. Электронные устройства с элементами нанометровых размеров // Электронная промышленность. 1993. № 10. С. 20.
2. Неволин В.К. Двухэлектродные элементы наноэлектроники на основе квантовых проводов // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 4. С. 293–300.
3. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения: Пер. с англ. Т. 6. М.: Мир. 1973. С. 97.
4. Matsumoto R., Takahashi S., Ishii V. and an. Application of STM Nanometer-Size Oxidation Process to Planar-Type MIM Diode // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. Part 1, No. 2B. P. 1387–1390.
5. Касумов А.Ю., Кислов Н.А., Кононенко О.В. и др. Новая концепция создания модельных элементов наноэлектроники // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. № 5. С. 52–60.

УДК 621.315.592

Е.И. Иващенко, Ю.Б. Цветков, канд. техн. наук, доц., МГТУ им. Н.Э. Баумана

МЕТОД РАЗМЕРНОГО СТОП-ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОМЕХАНИКИ

Исследован процесс анизотропного травления кремния ориентации (100) с электрохимической остановкой процесса в целях изготовления изделий микромеханики. Экспериментально подтверждена возможность самоостановки травления на этитаксиальном слое при подаче на него потенциала пассивации. Разработана система защиты топологии пластины от воздействия травителя. Установлен характер зависимости скорости травления от температуры раствора. Определены оптимальные режимы обработки кремния.

Введение

Устойчивая тенденция к миниатюризации в современной технике выразилась в появлении и бурном развитии ряда новых областей, объединенных концептуальным понятием – микромеханика, в основе которой лежит тот факт, что кремний, помимо общеизвестных полупроводниковых свойств, обладает великолепными прочностными и упругими свойствами, а также относится к числу пьезоэлектрических материалов [1]. Это позволяет в сочетании с современными электронными технологиями использовать его для изготовления чувствительных элементов микромеханических устройств и преобразовывать деформации встроенных в них тензорезисторов в электрические сигналы. Примеры таких устройств показаны на рис. 1.

В кремниевых соплах для струйных принтеров (рис. 1, а) размер отверстия составляет 20 мкм, причем на одной кремниевой пластине получают одновременно до 300...500 таких сопел, что способствует снижению разброса размеров отверстий.

Пьезорезистивный датчик давления (рис. 1, б) размером 3×3 мм и толщиной 0,4 мм имеет упругую диафрагму с размерами 1×1 мм и толщиной в пределах 10...20 мкм. Размещенные по краям мембраны диффузионные пьезорезисторы соединены в мостовую схему. При приложении давления мембрана изгибается, на ее внешней поверхности возникают напряжения, вследствие чего меняются сопротивление тензорезисторов и выходное напряжение мостовой схемы. Чувствительность и точность такого датчика соответствуют лучшим образцам подобных приборов при гораздо меньших (примерно на порядок) размерах. Это позволяет использовать их в аэрокосмической промышленности, автомобилях, медицине.