

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Электродные системы к углеродным нанотрубкам и методы их изготовления

А.И. Воробьева

Рассматриваются методы формирования электродных систем к углеродным нанотрубкам, которые используются в качестве конструктивных элементов в различных устройствах наноэлектроники. Анализируются способы уменьшения удельного сопротивления электродов и контактного сопротивления в структурах металл–углеродная трубка. Обсуждаются перспективы и реальные достижения в области использования нанотрубок в качестве межуровневых контактных переходов в системах многоуровневой металлизации интегральных микросхем.

PACS numbers: 73.63.Fg, 85.35.Kt, **85.40**, – e

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903b.0243

Содержание

1. Введение (243).
 2. Формирование электродных систем (межсоединений) в устройствах на основе углеродных наноструктур (244).
 3. Использование углеродных нанотрубок в качестве межуровневых контактных переходов в системах многоуровневой металлизации интегральных микросхем (248).
 4. Заключение (252).
- Список литературы (253).

1. Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие повышенной механической, термической и химической стабильностью в сочетании с хорошими электрическими свойствами, весьма перспективны для различных приложений. Этот новый материал доказал свою эффективность как источник холодной электронной эмиссии, как основа новых материалов с повышенными механическими характеристиками, как сорбент для газообразных и жидких веществ и т.п. [1–4]. Транзисторы, построенные из нанотрубок, в 500 раз меньше тех, что содержатся в современных микросхемах¹.

Но эти уникальные свойства относятся к отдельным нанотрубкам или "академическим" образцам, проблема же в том, чтобы изготовить макроскопический объект из нанотрубок с подобными характеристиками. До сих пор новые материалы и устройства на основе УНТ не

получили широкого распространения, что связано с высокой стоимостью и низкой производительностью существующих методов получения УНТ в макроскопических количествах, а также с проблемой получения надёжных, соответствующих размерам и свойствам УНТ, электродных систем. Под электродной системой для УНТ подразумевается совокупность контактных площадок и дорожек межсоединений в слое и между слоями (уровнями), если УНТ используются в качестве контактных переходов вместо металлизированных отверстий в многоуровневой металлизации. В электродную систему входит также контактное сопротивление границ раздела металл–УНТ, так как этот параметр в наноразмерных элементах может составить значительную часть общего сопротивления структуры металл–УНТ–металл.

Отечественная технология реально освоила пока только 1 мкм-технологии, поэтому наноустройства содержат в качестве наноэлементов углеродные нанотрубки при прочих элементах схемы, в частности электродных системах микронных размеров. Основная проблема, связанная с уменьшением размеров элементов, например транзисторов, упирается даже не в технологические сложности литографического процесса, который требует использования новых коротковолновых источников излучения, а в то, что экспоненциальное увеличение числа транзисторов на кристалле за счёт масштабирования приводит к экспоненциальному росту потребляемой мощности и, как следствие, к перегреву микросхемы. Причин тому несколько, но все они имеют один и тот же корень: уменьшение размеров транзистора приводит к возникновению токов утечки. Токи утечки протекают через слой диэлектрика нанометровой толщины, отделяющего область затвора от кремниевой подложки, а также между истоком и стоком при "выключённом" состоянии транзистора².

¹ См. Череповский К, <http://www.3dnews.ru/cpu/semiconductor/>.

А.И. Воробьева. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Республика Беларусь
E-mail: nil-4-2@bsuir.unibel.by

Статья поступила 11 июля 2008 г.,
после доработки 17 сентября 2008 г.

² См. Пахомов С *Компьютер Пресс* (1) (2003).

По прогнозам специалистов фирмы IBM — компания, совершившей в полупроводниковой индустрии не одну революцию, реальные нанотехнологии появятся не ранее 2010 г., когда промышленность перейдёт к миниатюризации размеров элементов не путем масштабирования (технологии "сверху-вниз"), а путём конструирования элементов из исходных наноэлементов (технологии "снизу-вверх") [5].

Этот переход будет обеспечен зондовыми методами формирования элементов и процессами атомно-слоевого осаждения. В принципе, такой вариант совершенствования технологии рассматривается специалистами как возможный путь развития полупроводниковой индустрии, но не как один из основных.

Усилия разработчиков в области синтеза нанотрубок сосредоточены в основном на методе химического осаждения из паро- (газовой) фазы (CVD), основанном на термическом разложении углеродсодержащих газов на поверхности металлического катализатора при температуре 500–1000 °С [6–9]. Поэтому для локального синтеза межсоединений на различных функциональных подложках электродные системы УНТ должны быть достаточно термо- и механически прочными.

2. Формирование электродных систем (межсоединений) в устройствах на основе углеродных наноструктур

Традиционно в качестве термостойких электродных материалов используют вольфрам, молибден и их соединения, полученные распылением композиционных мишеней. Промышленными технологиями получения распыляемых тугоплавких материалов являются методы порошковой металлургии: порошки относительно чистых металлов прессуют и отжигают до получения компактных изделий. В последнее время возникла потребность разработки новых безвольфрамовых материалов. Большое внимание уделяется композиционным материалам на основе карбида титана с мелкозернистой структурой. Весьма актуальной остается задача разработки новых составов электродных материалов, в том числе дисперсно-упрочнённых наночастицами (Ti–C–Cr–Ni, Ti–C–Ni–Al, Ti–C–Al) [10].

Так как углеродные трубки бывают металлическими и полупроводниковыми, оптимальное сочетание материалов электрод–УНТ может быть разным. Например сопротивление отдельных нанотрубок с металлической проводимостью может оказаться значительно ниже сопротивления подводящих дорожек, контактных площадок и контактных переходов из самых лучших проводящих материалов (Cu, Ag, Au).

Авторы работы [11] считают, что самым лучшим контактным материалом к полупроводниковым УНТ является палладий. Анализ расчётов показал, что полностью покрытые палладием одностенные УНТ имеют металлический тип контакта с Pd. Показано, что отдельные (индивидуальные) полупроводниковые УНТ с такими контактами могут работать и как обычный полевой униполярный МОП-транзистор (MOSFET — metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), и как транзистор с затвором Шоттки. То есть взаимодействие между УНТ и металлическим электродом и соответствующие эффекты электронной структуры на границе раздела ответственны за функционирование приборов на

УНТ, в частности, полевого транзистора на УНТ с Pd-электродами.

При разработке электродных систем для УНТ естественно необходимо учитывать сопротивление самих углеродных трубок. Для оценки проводимости однослойной УНТ можно использовать формулу двухполосника Ландауэра–Буттикера. Согласно этой формуле для одномерной системы с N параллельными каналами, проводимость $G = N(e^2/h)T$, где T — коэффициент пропускания электронов [12]. В УНТ благодаря спиновому и подрешёточному вырождению электронов в графене каждый канал является четырёхкратно вырожденным ($N = 4$). Следовательно, баллистическая проводимость единичной одностенной УНТ, при допущении наличия совершенных контактов ($T = 1$), задаётся уравнением $4e^2/h = 155$ мкСм, что даёт сопротивление порядка 6,45 кОм. Это теоретическое значение сопротивления идеальной УНТ, которое не может быть достигнуто реально.

Вследствие малых размеров нанотрубок только в 1996 г. удалось непосредственно измерить удельное электрическое сопротивление (ρ) четырёхконтактным методом [13]. Результаты измерений показали, что ρ трубок изменяется в широких пределах — от 5×10^{-6} до 0,8 Ом см; минимальная величина ρ оказалась на порядок ниже, чем у графита. Такой разброс значений также обусловлен тем, что трубки (и однослойные, и многослойные) могут иметь как металлическую, так и полупроводниковую проводимость. В опытах использовались нанесённые электронно-лучевым способом вольфрамовые контакты, поперечное сечение которых было на два порядка больше, чем у трубок.

Баллистическому транспорту носителей в многослойной УНТ (МСНТ) с квантованной проводимостью соответствует сопротивление 12,9 кОм ($G_0 = 2e^2/h$) [14]. Техника эксперимента постепенно совершенствуется, и в 2001 г. удалось провести измерения на многослойных трубках диаметром 8,6 нм [15], которые показали, что нанотрубки с минимальным $\rho = 5 \times 10^{-6}$ Ом см могут пропускать огромную плотность тока, $\sim 1,8 \times 10^{10}$ А см⁻². При $T = 250$ °С такой ток сохранялся в течение двух недель (334 ч) без какой-либо деградации трубки за счёт электромиграции.

Таким образом, проводимость нанотрубки не зависит ни от ее длины, ни от толщины (диаметра) и равна кванту проводимости — предельному значению проводимости, которое отвечает свободному переносу электронов.

Многослойные (многостенные) УНТ имеют множество одномерных проводящих стенок, и проводимость реальной МСНТ будет зависеть от количества проводящих стенок, контактирующих со слоями электродов, т.е. от площади контакта. Второй источник сопротивления для МСНТ — наличие рассеяния электронов, которое приводит к длине свободного пробега порядка 1 мкм [12]. В случае УНТ-контактных переходов высота контакта, равная 9λ , где λ — параметр, зависящий от проектных норм и равный половине минимального топологического размера, обычно меньше 1 мкм, следовательно, высота УНТ-межсоединения не даёт сколько-нибудь заметного вклада в сопротивление массива УНТ. Вклад в контактное сопротивление дают несовершенные контакты металл–нанотрубка (в плоскости слоя межсоединений).

Современные технологические решения позволяют получить сопротивление контактного перехода металл–нанотрубка ниже 1 кОм на один контакт [12]. Полное сопротивление УНТ можно представить как сумму трёх составляющих: теоретическое сопротивление идеальной одномерной системы (УНТ), сопротивление рассеяния и сопротивление контакта металл–нанотрубка, обусловленное несовершенством этой границы раздела.

В ряде работ приводятся реальные значения сопротивления МСНТ, которые на порядок величины больше теоретических [16, 17]. Например, в работе [16] приводятся значения последовательного сопротивления межслойных контактных переходов (1000 отверстий диаметром 700 нм, заполненных МСНТ), которое составляет 1,2 кОм при плотности УНТ $2,7 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, что соответствует сопротивлению 176 кОм на одну МСНТ диаметром 10 нм. Нижний электрод сформирован из нитрида титана, верхний — из алюминия с адгезионным подслоем из титана.

Существует несколько причин, объясняющих такое большое сопротивление и позволяющих найти пути его уменьшения. Во-первых, контакты к нанотрубкам пока (на данный момент) не являются совершенными. Обычно металлический контакт осуществляется к боковой стенке УНТ. В случае МСНТ контакт имеет место только к наиболее удалённому от середины слою. Предпочтительным же является контакт ко всем слоям. Теоретические работы [18, 19] показывают, что проводимость резко падает, когда длина области сопряжения (контакта) меньше 10 нм. Для точечного контакта анализатора на основе атомного силового микроскопа это может быть существенным и вместе с контактом зонд–УНТ даёт вклад в измеряемое сопротивление. Кроме того, сопротивление контакта зависит от диаметра и хиральности трубки.

На поверхности подложки (нижняя часть УНТ) трубки растут непосредственно из слоя катализатора и имеют достаточно сильную связь с металлической плёнкой нижнего электрода, поэтому здесь хороший электрический контакт достигается подбором плёночной пары электрод–катализатор. Такими плёнками могут быть Ti, TiN, Au, W, Pt, Pd, сплав Ti/Ag. В качестве адгезионного подслоя используются плёнки Cr, Nb или Ta. В работе [20] предлагается слой катализатора (Ni) наносить в едином вакуумном цикле на плёнку нижнего электрода (Ti). Такая процедура позволила снизить контактное сопротивление МСНТ–электрод на два порядка величины по сравнению с образцами, в которых в качестве электрода использовалась непосредственно плёнка катализатора (никеля). Авторы полагают, что это связано с формированием карбида титана (TiC) в процессе селективного осаждения углеродных трубок методом химического осаждения из газовой фазы с использованием термоэлектронного катода прямого накала (HFCVD — hot-filament chemical vapor deposition). Карбид титана представляет собой очень твёрдое и тугоплавкое (температура плавления $T_m = 3250^\circ\text{C}$) соединение и хорошо проводит электрический ток (лишь немногим хуже самого металла).

Естественно, что качество самого материала (МСНТ) даёт вклад в сопротивление. Чем больше стенок в МСНТ, тем больше дефектов и тем больше сопротивление трубки. В то время, как для идеальной МСНТ все

стенки параллельны друг другу относительно центральной оси ($\theta = 0$), в большинстве реальных структур существует незначительный угол θ . В результате электроны должны пересекать графитовые слои в таких структурах для того, чтобы переместиться от одного конца трубки к другому. Это даёт значительно большее сопротивление, подобно тому как если бы электрон двигался перпендикулярно к базисной плоскости графита. Баллистический транспорт возможен только в идеальной МСНТ [21].

Межслойное сопротивление с контактами на массивах УНТ (МСНТ) определяется параллельностью и однородностью УНТ в массиве. Число УНТ в массиве должно быть таким, чтобы распределение тока по УНТ не выходило за пределы нескольких микроампер на одну трубку, так как сопротивление трубок значительно увеличивается, если это условие не соблюдается [21].

На практике для улучшения свойств контакта металлические катализаторы, такие как Fe, Co, Ni, могут быть осаждены на торцы МСНТ до получения внешних дорожек металлизации. Термический отжиг в присутствии переходного металла также улучшает электрический контакт между УНТ и металлическими дорожками [22]. Проводимость самих УНТ может быть увеличена введением таких включений, как I или W для улучшения электронного транспорта через графитовые слои [23].

В литературе имеются сообщения о сверхпроводимости УНТ в контакте с определёнными материалами. Во-первых, сверхпроводящий переход при $T_c \sim 0,4 \text{ K}$ был зарегистрирован в связках одностенных УНТ [24]; во-вторых, эффект Мейснера обнаружен в массиве самых тонких УНТ диаметром около 0,4 нм [25]. Сообщается о наблюдении сверхпроводимости многостенных (преимущественно 9-стенных) УНТ при $T_c \sim 10 \text{ K}$ [26]. Массивы контактов Au–многостенная УНТ–Al были сформированы в нанопорах подложки из оксида алюминия. При этом (что подтвердила просвечивающая электронная микроскопия) контакты Au–МСНТ относились к одному из следующих трёх типов (рис. 1): (а) все стенки каждой МСНТ контактируют с Au-электродом, (б) с электродом контактирует лишь часть стенок каждой МСНТ, (в) контакт с электродом имеют лишь внешние стенки МСНТ (так получается, если МСНТ не планаризованы). Сверхпроводимость была обнаружена только в МСНТ с контактами типа (а). В МСНТ с контактами типа (в) не наблюдалось ни особенностей вольт-амперных характеристик (ВАХ), ни падения сопротивления (R), тогда как в МСНТ с контактами типа (б) при понижении температуры R выходило на насыщение и даже слегка уменьшалось при $T < 3,5 \text{ K}$. А на дифференциальных ВАХ при $T < 4 \text{ K}$ в окрестности $I = 0$ появлялся минимум, глубина которого увеличивалась по мере уменьшения температуры. Это говорит о том, что не все стенки МСНТ в равной степени участвуют в сверхпроводимости, и позволяет понять причину низких T_c в одностенных УНТ. Авторы [26] полагают, что число стенок N в МСНТ сильно влияет на конкуренцию сверхпроводящего состояния с состоянием электрон-электронного отталкивания (жидкость Томонаги–Латтинжера). В качестве одного из возможных путей увеличения T_c они предлагают попытаться увеличить концентрацию свободных носителей путём легирования многостенных УНТ, например бором или кальцием.

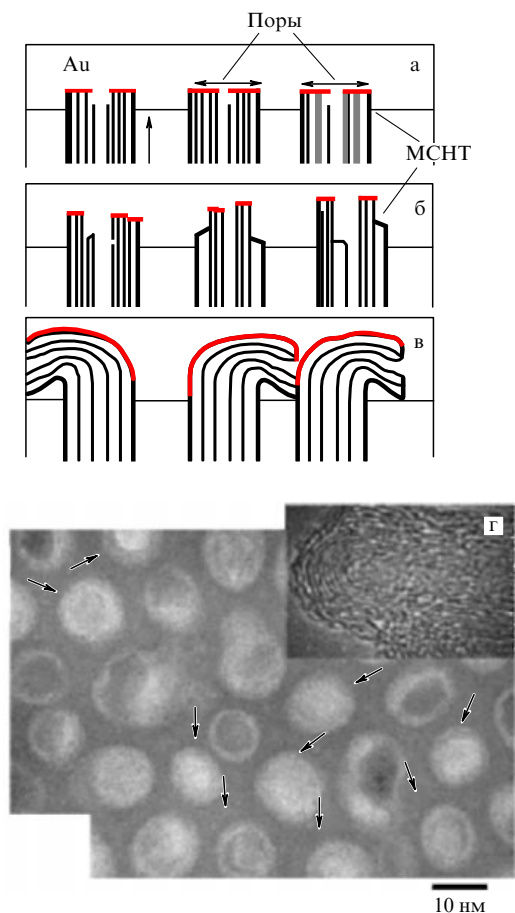


Рис. 1. (а–в) Схематическое изображение продольных сечений различных типов контактов многослойных УНТ с плёнкой Au; (г) изображение поперечного сечения массива многослойных УНТ, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (на вставке — отдельная МСНТ).

В работе [27] показано, что имеет место линейная зависимость электрического сопротивления нанотрубки (с двумя золотыми электродами) от механической нагрузки, которая, в свою очередь, пропорциональна избыточному давлению. Линейная зависимость сохраняется в диапазоне изменения избыточного давления от 0 до 140 кПа.

Это позволяет использовать углеродные нанотрубки для решения ряда задач наноэлектромеханических систем (NEMS — nano electromechanical system). Их преимущества — в миниатюрных размерах, сочетающихся с хорошей проводимостью и высокой чувствительностью электронных характеристик к механическому воздействию. Трудности внедрения связаны с невоспроизводимостью параметров УНТ-структур при массовом производстве. Сообщается [28] о возможностях преодоления невоспроизводимости за счёт процедуры, которая иллюстрируется на рис. 2.

На первом этапе процесса (а) в подложке с подслоем SiO₂ протравливают паз глубиной ~ 20 нм, шириной 100–300 нм и длиной 10 мкм, который заполняют сплавом Ti/Au, так что поверхность металла, используемого в качестве нижнего электрода, оказывается ниже поверхности подложки на 1–10 нм. На второй стадии (б) на поверхности подложки химическим путем протравливают неглубокие треки шириной 100 нм, которые служат

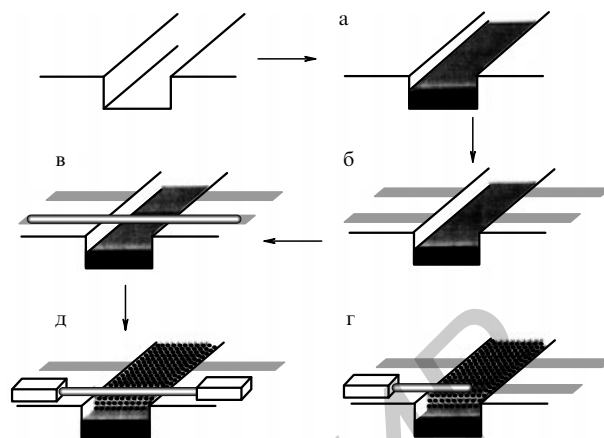


Рис. 2. Последовательность изготовления и конструкция контактов для переключателей на УНТ.

ложем для нанотрубок, утапливаемых и закрепляемых в пазах за счёт адсорбции. При этом возможна как одноконтактная (г), так и двухконтактная (д) конфигурация устройства. Электрическое сопротивление нижнего электрода — 600 Ом, а закреплённых в двух точках нанотрубок — в диапазоне между 30 и 100 кОм.

Одноконтактную конфигурацию (г) исследовали в качестве электрического переключателя. Нанотрубка диаметром 22 нм нависала в виде консоли на высоте 4 нм по длине 115 нм над утопленным в подложку электродом. При напряжении менее 3 В никакого тока через контакт не наблюдали. При превышении этого напряжения ток резко возрастал от нуля до нескольких сотен наноампер. Интересно, что ток через прибор остаётся неизменным при снижении напряжения до ~ 0,5 В. Такое поведение обусловлено эффектом электростатического притяжения нанотрубки к нижнему электроду при приложении внешнего напряжения. Описанный переключатель может найти применение в устройствах памяти, а конструкция контактов — в других приборах на УНТ.

В работе [29] описано использование метода индуцированного электронным лучом осаждения металла (EBID — electron-beam induced deposition) для непосредственного формирования межсоединений на углеродных нанотрубках. Метод является безмасочным — прямое формирование рисунка или изображения, и пригоден при изготовлении NEMS. Разработанный процесс включает абсорбцию УНТ из раствора на предварительно структурированной (с рисунком) поверхности образца, локализацию УНТ с использованием сканирующего атомного силового микроскопа (АСМ) на рисунок межсоединений, а также создание контакта к УНТ из вольфрама, полученного методом EBID. EBID-осаждение вольфрама выполнялось комбинацией метода электронно-лучевой литографии и АРМ-проектировщика (АРМ — автоматизированное рабочее место, CAD [design] workstation), используя гексакарбонил вольфрама в качестве прекурсора. При хорошо контролируемых условиях осаждения было получено удельное сопротивление контакта порядка 10^{-2} Ом см. Более того, электрические измерения на УНТ с EBID-вольфрамовыми выводами ясно показывают транзисторное поведение контактов в NEMS. Нанотрубки изготовили, используя пористый

оксид алюминия в качестве носителя. Таким образом, EBID-метод даёт возможность формировать верхнюю металлизацию УНТ (наружные контакты к УНТ) на подвешенной структуре на основе NEMS, что позволяет увеличить механическую прочность всей конструкции.

В ряде работ рассматриваются методы уменьшения контактного сопротивления металл–УНТ (МСНТ), в частности, представлены исследования влияния скорости отжига [30–33].

В работе [30] для увеличения проводимости матрицы из углеродных нанонитей использовали скоростной термический отжиг при температуре 800–1050 °С в течение одной минуты в среде H_2 и N_2 . Авторы считают, что эффективное сопротивление нанонитей уменьшается (на 30 %) за счёт уменьшения контактного сопротивления между нанонитями и нижним электродом на кремниевой подложке. Одновременно улучшаются термические свойства нанонитей.

Вертикально упорядоченные УНТ, полученные на кремниевой подложке при низкой температуре (< 520 °С) методом PCVD (процесс химического осаждения из газовой фазы в микроволновой плазме), имеют полупроводниковый характер проводимости контактов после отжига. Эквивалентная схема структуры металл–МСНТ–металл представляет собой встречно-параллельное включение двух диодов Шоттки [31].

В работе [32] для улучшения свойств контакта УНТ–электрод (металл) использовали скоростной термический отжиг в диапазоне от 500 до 800 °С. Авторы считают, что улучшение контактных свойств (возникновение омического контакта) обусловлено формированием карбида металла на границе раздела металл–УНТ. На рисунке 3 приведены вольт-амперные характеристики контакта в зависимости от температуры скоростного отжига. Проводимость dI/dV контакта увеличилась от 30 мСм при 500 °С до 50 мСм при 800 °С.

В работе [33] показано, что контактное сопротивление между УНТ и металлическим электродом уменьшается на несколько порядков величины и становится одновременно стабильным после того как УНТ, контактирующие с Ti–Au электродами, отжигались методом скоростного отжига при 600–800 °С в течение 30 с. Контактное сопротивление отожжённых образцов находилось в диапазоне 0,5–50 кОм при комнатной температуре в зависимости от свойств УНТ. Короткое время и относи-

тельно низкая температура отжига позволили создать поверхность контакта Ti–УНТ, пригодную для электрических измерений. Для образцов с относительно низким контактным сопротивлением при комнатной температуре (0,5–5 кОм) контактное сопротивление остаётся постоянным или слегка уменьшается с понижением температуры. С другой стороны, для образцов с относительно высоким сопротивлением (5–50 кОм) имеет место увеличение контактного сопротивления с уменьшением температуры.

В работе [34] исследуются гетеропереходы Si–МСНТ–Si, в которых УНТ сформированы непосредственно между сильнолегированными навесными областями кремниевых микроструктур, разнесёнными на 5–10 мкм. Используется метод локального отжига в электрическом поле с напряжённостью 0,2–1 В мкм⁻¹. Наблюдали два типа УНТ — вершинные и корневые — для двух разных морфологий гетеропереходов. Измерения на структурах Si–МСНТ–Si показали линейные ВАХ, что указывает на омический характер контактов с сильнолегированным кремнием.

В работе [35] в качестве электродов для измерения электропроводности нанотрубок из фуллеренов на поверхности кремниевой подложки методом электронно-лучевой литографии были сформированы электродные полоски микронного размера из сплава Ti/Ag, разделённые расстоянием 0,8 мкм. Нанотрубки из фуллеренов изготовили совместно исследователи из Пекинского университета и Института химии китайской академии наук, используя пористый оксид алюминия в качестве носителя. Многократное заполнение цилиндрических пор оксида раствором фуллерена C_{60} в толуоле с последующим высушиванием привело к образованию внутри пор нанотрубок длиной от 1 до 40 мкм и с толщиной стенок ~ 30 нм, диаметр которых (200–300 нм) соответствует диаметру пор. Наблюдения, выполненные с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показали, что материал нанотрубок представляет собой поликристаллический фуллерит C_{60} .

Индивидуальную нанотрубку с помощью наноманипулятора помещали между металлическими электродами. Измерения вольт-амперных характеристик нанотрубок проводили на воздухе при различных температурах, а также в условиях оптического облучения. Темновая проводимость, измеренная на длине трубки 1 мкм, оказалась равной величине $2 \times 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, что существенно ниже вычисленной ранее для кристалла фуллерита C_{60} ($10^{-6} - 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$). Столь существенное различие объясняется влиянием кислорода, сорбированного на поверхности молекул фуллерена и создающего примесные центры, являющиеся ловушками для носителей. Это предположение подтверждают измерения проводимости таких же образцов в условиях вакуума, согласно которым величина проводимости составляет $1,9 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Для разработки тестовой структуры и методики измерения проводимости многослойных УНТ, синтезированных в пористом оксиде алюминия, в работе [36] использовали результаты исследования электрических свойств нанопроволок Ge толщиной от 50 до 100 нм, встроенных вертикально в такую же диэлектрическую матрицу из анодного оксида алюминия (АОА). Сопротивления МСНТ и Ge-нанопроволок с близкими значениями геометрических параметров оказались соизмери-

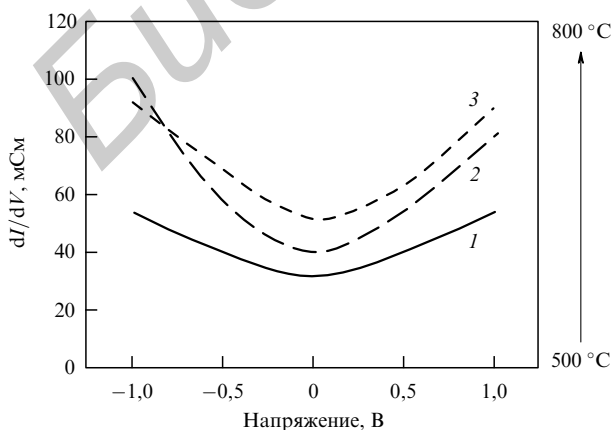


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры Ti–УНТ–Ti–Au в зависимости от температуры скоростного отжига.

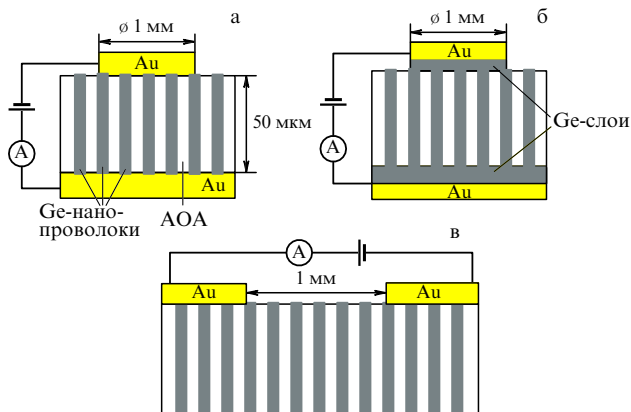


Рис. 4. Схема процесса формирования контактов к матрице нанопроволок.

мыми. Опыты были осуществлены в двух вариантах. В первом варианте были проведены макроконтактные измерения для больших групп нанопроволок, как показано на рис. 4. Для создания омических контактов пластинки, содержащие вертикально выстроенные нанопроволоки, полировали алмазной пастой до тех пор, пока выступающие нанопроволоки не удалось наблюдать с помощью АСМ. Затем с кончиков нанопроволок бомбардировкой ионами аргона с энергией 5 кэВ снимали оксидный слой. После этого методом химического осаждения на обе поверхности пластинки наносили Au-контакты.

Во втором варианте удалось "подключиться" к отдельным нанопроволокам и исследовать их проводимость. Это оказалось возможным с помощью модифицированного АСМ, допускающего измерение проводимости (C-AFM — conductance measuring atomic force microscope).

Оба метода (макроконтактное подсоединение и измерение проводимости отдельных нанопроволок) дали близкие величины проводимости и вольт-амперные характеристики, указывающие на наличие омических контактов. В частности, измеренные энергии активации проводимости оказались равными 0,58 и 0,61 эВ при измерениях на макро- и микроконтактах соответственно. Эти величины близки к ширине запрещенной зоны объемного Ge, равной 0,66 эВ. Величина удельного сопротивления нанопроволок оказалась значительно выше по сравнению с сопротивлением чистого объемного Ge (0,47 Ом м), что авторы [36] объясняют эффективным рассеянием носителей заряда поверхностью нанопроволок. Именно с этим связано увеличение сопротивления по мере уменьшения диаметра проволоки.

В работе [37] для непосредственного измерения сопротивления МСНТ предлагается устройство типа четырехзондовой головки, изготовленное с использованием обычной кремниевой технологии микрообработки. Устройство позволяет определять сопротивление индивидуальных наноструктур с учетом контактного сопротивления, исследовать вольт-амперные характеристики при различном расстоянии между измерительными зондами. Проведенные исследования показали, что данный метод имеет относительно небольшую ошибку измерений, от $\pm 1,5$ до 12 кОм, которая увеличивается за счет разброса значений измеряемой величины из десяти последовательных измерений (от $\pm 0,1$ до 1 кОм). Пока-

зано, что контактное сопротивление может достигать 15–50 кОм, т.е. двухконтактный метод дает существенную ошибку измерений. Среднее значение сопротивления для 39 МСНТ, полученных методом CVD, составляет 4,7 кОм.

В работе [38] с целью создания болометров и электронных охладителей исследованы контакты одиночных углеродных нанотрубок и пучков УНТ со сверхпроводящими и металлическими электродами. Получены туннельные контакты УНТ с алюминиевыми электродами. Исследованы ВАХ переходов при температурах от комнатной до 300 мК. Показано, что сопротивление отдельных нанотрубок в основном определяется собственными дефектами и оказывается слишком высоким для многих практических применений. При использовании пучков нанотрубок удаётся существенно снизить сопротивление болометра, которое определяется небольшим количеством проводящих трубок, имеющих достаточно хорошие туннельные контакты с электродами. Структуры, содержащие пучки углеродных нанотрубок, могут быть описаны в рамках модели с барьером Шоттки. Образцы с пучками УНТ продемонстрировали болометрический отклик на внешнее высокочастотное облучение на частоте 110 ГГц с амплитудой до 100 мкВ и температурный отклик по напряжению до $0,4 \text{ мВ К}^{-1}$.

Таким образом, контактное сопротивление металл–УНТ изменяется под воздействием температуры, давления, излучения (т.е. внешних условий) и, кроме того, зависит от свойств и условий получения самих УНТ. Характер проводимости контактов и структуры металл–УНТ–металл также зависит от многих факторов. Поэтому экспериментальные значения сопротивления контактов в разных работах разные, однако общие закономерности изменения этого параметра от внешних воздействий позволяют определить методы его уменьшения: кратковременный высокотемпературный отжиг, планаризация (выравнивание, сглаживание микро-рельефа) поверхности УНТ, удаление оксидного слоя с кончиков нанопроволок или УНТ бомбардировкой ионами аргона перед нанесением контактов или измерениями с помощью зондов. Следует также учитывать сопротивление точечного контакта анализатора на основе АСМ (зонд–УНТ), которое может давать существенный вклад в измеряемое значение. Полезным может оказаться использование в качестве электродных материалов сплавов или металлов, легированных определенными примесями, сверхпроводников и гетеропереходов. Немаловажной является конструкция контакта, в том числе её размерные параметры, и конструкция всей структуры металл–УНТ–металл в целом.

Проведенный анализ показывает, что есть много возможностей для создания хороших омических контактов к УНТ (МСНТ) и нанопроволокам, что, в свою очередь, является ключевым моментом для разработки приборов электроники, спинтроники и оптоэлектроники.

3. Использование углеродных нанотрубок в качестве межуровневых контактных переходов в системах многоуровневой металлизации интегральных микросхем

Большое количество работ посвящено использованию УНТ в качестве проводящего материала (дорожек межсоединений и контактных переходов) вместо меди и

других металлов в интегральных микросхемах (ИС) [39–42]. В этом случае также большое значение имеют как свойства самих УНТ, так и контактные явления. Исследователям ИС из компании Infineon Technologies (г. Мюнхен, Германия)³ удалось вырастить углеродные нанотрубки в заранее заданных местах на 6-дюймовых кристаллических пластинах ИС. Компания надеется, что это достижение позволит ей заменить все металлические проводники на кристаллах ИС углеродными нанотрубками. Многочисленные преимущества УНТ делают их наилучшим материалом для современной полупроводниковой технологии — они обладают существенно более высокой надёжностью и позволяют значительно увеличить тактовые частоты ИС на одном кристалле. Достаточно высокая проводимость УНТ позволяет обеспечивать большую плотность тока — до 10^{10} А см⁻². Проводники из высокопроводящих чистых металлов (Au, Ag, Cu) при пропускании электрического тока плотностью уже 10^6 А см⁻² разрушаются из-за джоулева нагрева и электромиграции атомов, а медь начинает плавиться при плотности тока 10^7 А см⁻².

Исследователи предсказывают, что в ближайшие 10 лет монтажные соединения кристаллов ИС должны будут пропускать плотности тока до $3,3 \times 10^6$ А см⁻², что для обычных проводников невозможно. Вследствие высокой плотности тока и образующегося из-за этого тепла обычные межслойные переходные отверстия приводят к искажению рабочих характеристик чипов. Ток в углеродных нанотрубках протекает без эффекта трения, тем самым избыточное тепло не формируется. Тепло возникает только в точках контакта УНТ с другими материалами. Высокая теплопроводность УНТ помогает и в этом случае — она почти в два раза больше, чем у алмаза (3000 Вт м⁻¹ К⁻¹)⁴.

Сотрудники Georgia Institute of Technology (США) рассмотрели возможность использования углеродных нанотрубок в качестве межсоединений в сверхбольших (гигабитных) интегральных схемах [39]. Оказывается, что необходимость поиска альтернативы сегодняшней меди вызвана ещё и тем, что при нанометровых размерах медных межсоединений в них значительно усиливаются процессы электромиграции; кроме того, значительно возрастает сопротивление из-за размерных эффектов (рассеяние на границах зерен и шероховатостях поверхности). Напротив, электроны в углеродных нанотрубках имеют длину свободного пробега в несколько микрометров и, следовательно, способны выдерживать исключительно большие плотности тока при малых размерах дорожек. По предположению исследователей [39–41] углеродные нанотрубки выступают в качестве межсоединений в технологии с нанометровыми проектными нормами (вплоть до 22 нм). Наступление этой эры ожидается к 2016 г. Однако многие методы производства УНТ, такие, например, как лазерная абляция и дуговой разряд, трудно совместить с полупроводниковой технологией. Другим важным препятствием является, опять же, создание хорошего контакта УНТ с кремнием.

В ряде патентов [43, 44] предлагаются конструктивно-технологические варианты изготовления контактных переходов между уровнями в многоуровневых

системах межсоединений (МСМ) с использованием УНТ. В патенте [43], например, первый уровень межсоединений предлагается изготавливать из Al, Mo, Cr, Ti, Ta, Pt, Ir или легированного Si толщиной в диапазоне $1 \text{ нм} \leq h_1 \leq 2 \text{ мкм}$. В качестве подложки может использоваться Si с изолирующим слоем из SiO_x, Si_yN_z или другого изолирующего материала толщиной 200–500 нм и более. Далее селективно, по определённом рисунку осаждается Ni, Fe или Co толщиной $1 \leq h_2 \leq 30 \text{ нм}$ в качестве катализатора роста УНТ. Расстояние между фигурами роста (точки, квадраты, треугольники и т.д.) составляет $30 \text{ нм} \leq d \leq 10 \text{ мкм}$. УНТ высотой 0,1–20 мкм, диаметром $10 \leq D \leq 200 \text{ нм}$ выращивают методом CVD в диапазоне температур $400 \leq T \leq 1000$ °С. Далее формируется изолирующее покрытие между УНТ и между слоями металлизации из материала с низкой диэлектрической проницаемостью. Затем проводится химико-механическая полировка для сглаживания микрорельефа поверхности (планаризация) и для открытия концов УНТ. Второй уровень межсоединений формируется из тех же материалов. Удельное сопротивление единичной МСНТ порядка 50–300 кОм, связки (пучка УНТ) — менее 2 кОм. Такие контактные переходы выдерживают плотности тока 10^6 А см⁻² в течение нескольких часов.

В патенте [44] для создания УНТ-межсоединений на полупроводниковой подложке предложен способ, включающий формирование по крайней мере одной нанотрубки в канавке на подложке, травление нанотрубки по крайней мере с одной стороны для создания отверстия внутри нанотрубки, конформное осаждение (однородное по вертикальным и горизонтальным поверхностям осаждение на структуры с большим аспектным отношением) металлического слоя в углеродную трубку через отверстие, т.е., по существу, формирование металлизированного контакта через отверстие в углеродной трубке. Конформное нанесение металлического слоя в углеродную трубку предлагается проводить с использованием процессов атомно-слоевого осаждения или нанесения покрытия методом химического восстановления. Смачиваемость углеродных нанотрубок можно изменить (модифицировать) перед нанесением покрытия методом химического восстановления для увеличения гидрофильности углеродных нанотрубок.

Приводятся и другие варианты изготовления межсоединений с использованием УНТ. Число зарегистрированных патентов в области нанотехнологий с 1976 по 2004 г. составило 88546, из них 64 % принадлежат США [45].

В патентах, как правило, охватывается широкий спектр материалов, режимов их получения и конструктивных параметров элементов готового изделия, чтобы расширить объём притязаний. Это не позволяет, однако, воспроизвести процесс без ознакомления с деталями ("ноу-хау" — секреты производства, необходимые для решения данной технической задачи, конфиденциальная информация), которые и составляют существо изобретения. Зачастую не уточняется, как именно можно изготовить, например, слой толщиной 1 нм или конформно заполнить металлом трубку нанометрового диаметра и с большим аспектным отношением.

В работе [21] подробно представлен метод проектирования и изготовления УНТ-контактных переходов "снизу-вверх", т.е. конструирование структур из исход-

³ См. http://www.online-ic.com/news_rus.asp.

⁴ См. Петров А, <http://nanocarb.jino-net.ru/index.>, <http://subscribe.ru/archive/science.news.nauka/>.

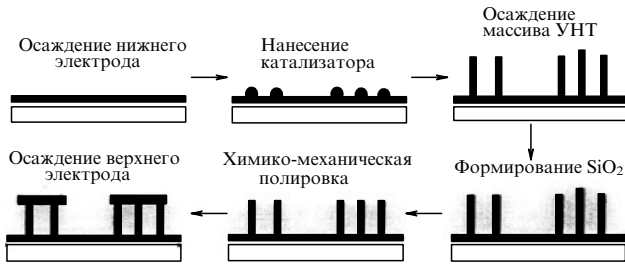


Рис. 5. Схема процесса формирования межуровневых УНТ-контактных переходов.

ных нанозаполнителей, а не минимизация размеров элементов путем масштабирования (технология "сверху-вниз").

На рисунке 5 показана схема процесса формирования межуровневых УНТ-контактных переходов. На кремниевую пластину (100) с термическим оксидом толщиной 500 нм осаждаются плёнки Сг или Та (200 нм) в качестве дорожек первого уровня и Ni-катализатор толщиной 20 нм методом ионно-лучевого распыления в виде точек при создании локального контакта или как сплошной слой для металлизации в целом. Затем методом PCVD формируют матрицу МСНТ небольшой плотности. Далее пространство между трубками конформно заполняется SiO₂ методом CVD. С помощью химико-механической полировки сглаживают (планаризуют) рельеф поверхности и открывают концы трубок. Затем осаждаются верхние электроды так, чтобы контакт осуществлялся ко всем слоям МСНТ. Как показано на рис. 6в, МСНТ выступают над SiO₂ на 30–50 нм благодаря лучшей механической прочности (упругости) МСНТ при полировке. Яркий контраст на фотографии указывает на конформное защитное покрытие SiO₂ вокруг каждой УНТ даже на выступающих участках.

Сглаженные (планаризованные) SiO₂–МСНТ структуры без верхнего электрода использовали для измерений ВАХ на атомном силовом микроскопе с помощью модифицированного модуля считывания тока (токовое считывание). В качестве зонда использовали кантилевер из Si₃N₄, покрытый плёнкой Pt. Тёмные точки на фотографиях образцов (рис. 6а–в), полученных с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), соответствуют выступающим МСНТ, указывая на то, что МСНТ имеют более высокую проводимость, чем SiO₂, и являются хорошо изолированными в SiO₂ матрице. На рисунке 6г показаны типичная ВАХ одной МСНТ и компактного пучка из МСНТ (250 × 500 нм). Вольт-амперные характеристики единичной МСНТ линейны в пределах ошибки эксперимента ±10 нА. Сопротивление единичной МСНТ порядка 300 кОм, а для пучка МСНТ меньше 2 кОм. Вольт-амперная характеристика изолирующего слоя SiO₂ выглядит вблизи нуля, как прямая линия, со среднеквадратичным шумом 1 пА. Дополнительные измерения с использованием четырёхзондовой головки, связанной с анализатором параметров полупроводников, были выполнены для изучения пучков МСНТ в диапазоне ±5,0 В. Как видно из вставки к рис. 6г, идеальная линейная зависимость даёт значение сопротивления 5,2 кОм, что соответствует 60-ти параллельно собранным МСНТ, контактирующим с зондом диаметром 25 мкм, и это согласуется с плотностью МСНТ на рис. 6в. В этих экспериментах периодическое

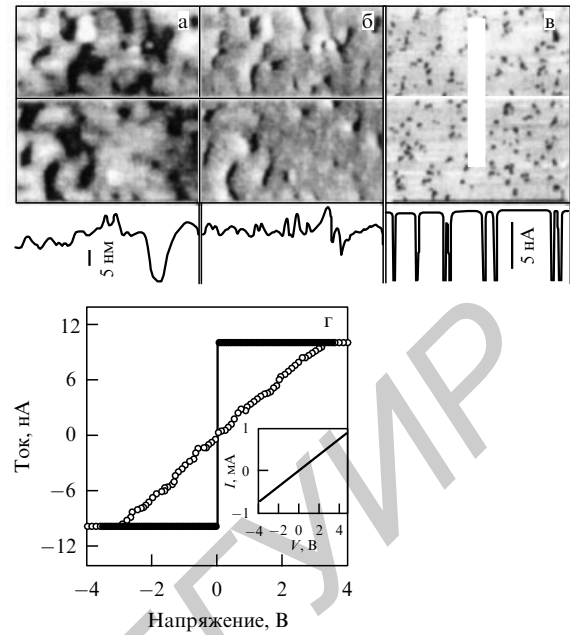


Рис. 6. (а–в) Микрофотографии экспериментальных образцов (планаризованные структуры SiO₂–УНТ без верхнего электрода) [21]; (г) типичная ВАХ одной МСНТ и компактного пучка из МСНТ (250 × 500 нм).

приложение сигнала с плотностью тока 1×10^6 А см⁻² в течение многих часов не приводило к повреждению образцов. Ранее уже сообщалось, что деградация межсоединений не наблюдается даже при плотности тока 1×10^{10} А см⁻², несмотря на несовершенные (неплотные) термические контакты. Таким образом, МСНТ, встроенные в матрицу SiO₂, будут выдерживать более высокие плотности тока, чем те, которые потребуются согласно прогнозам развития полупроводниковой технологии ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) — международной отраслевой группы, которая помогает устанавливать стандарты для отрасли производства микросхем⁵.

В работе [46] сравниваются обычные контактные переходы с переходами на основе УНТ по мере уменьшения проектных технологических норм. При размерах контактных переходов из меди порядка 40 нм начинают проявляться размерные эффекты (рассеяние носителей заряда на поверхности проводника и на границах зёрен металла), вызывая увеличение сопротивления проводников. Кроме того, высокорезистивный диффузионный скин-слой, присущий медным проводникам, занимает примерно 20 % сечения дорожки при любых проектных (в данной работе используется термин "технологических") нормах. Это уменьшает эффективную площадь проводимости проводников, что дополнительно увеличивает их сопротивление.

Вертикальные контактные переходы между дорожками межсоединений сигнальных слоёв имеют наименьшие поперечные размеры среди всех внутрикристалльных межсоединений. В результате при уменьшении технологических норм (менее 90 нм) плотность тока в контактных переходах увеличивается со значительно большей скоростью, чем в других межсоединениях (рис. 7). Это

⁵ Semiconductor Industry Assoc., 2003, <http://public.itrs.net/>.

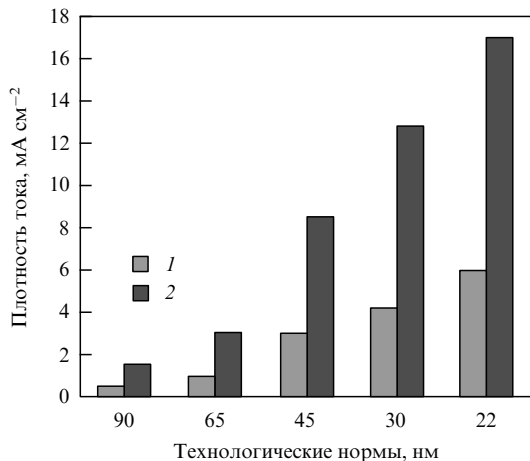


Рис. 7. Сравнение плотности тока в дорожках межсоединений (1 — по данным ITRS) и плотности тока, рассчитанной для контактных переходов с размерами, соответствующими ширине дорожек (2), для различных технологических норм.

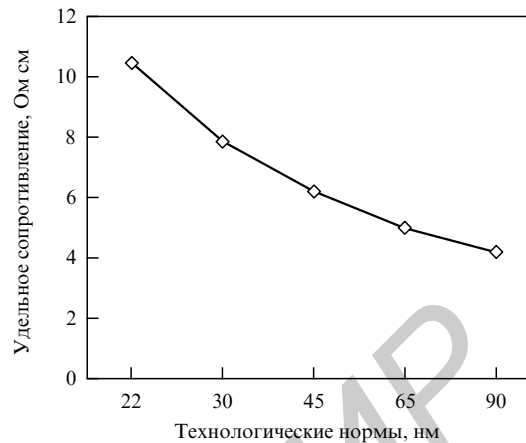


Рис. 8. Удельное сопротивление медных проводников с размерами, сравнимыми с длиной свободного пробега электронов, при различных технологических нормах.

делает металлические контактные переходы наиболее уязвимыми к электромиграции и термическим отказам.

Количество контактных переходов ограничивается также областью трассировки из-за эффектов затенения. Все это требует создания новых методов формирования контактных переходов в нанометровом диапазоне. Авторы статьи находят, что электрические (физические) ограничения на величину контактного сопротивления для металлов, особенно в контактных переходах, значительно жёстче, чем сообщалось ранее, и пределы пропускной способности по току обычных переходов делают их чрезвычайно дорогими при технологических нормах ниже 45 нм.

В связи с вышеизложенным для решения проблемы надёжность/термостойкость наноконтактов в работе [46] предлагается использовать в качестве контактных переходов углеродные трубки, для которых оцениваются соответствующие параметры в сравнении с медными и вольфрамовыми контактными переходами.

Было рассчитано удельное сопротивление проводников с размерами меньшими, чем значение длины свободного пробега в металле (например, для Cu — 40 нм, W — 34 нм при комнатной температуре), и экспериментально проверено на проводниках из меди толщиной 50 нм. Оказалось, что размерные эффекты и наличие диффузионного скин-слоя конечного размера вызывают резкое увеличение удельного сопротивления межсоединений, когда их размеры сравнимы с длиной свободного пробега электронов. Рисунок 8 показывает зависимость величины удельного сопротивления меди от указанных факторов при изменении технологических норм. Видно, что удельное сопротивление медного проводника, изготовленного по нормам 90 нм, увеличивается во много раз по сравнению с объёмным удельным сопротивлением (1,9 мкОм см).

В работе показано, что сопротивление контактных площадок и сквозных контактных переходов существенно преобладает над сопротивлением дорожек межсоединений при технологических нормах менее 50 нм. Это связано с тем, что масштабирование приводит к более плотной упаковке дорожек в слое, а расстояние между металлическими слоями по вертикали (которое

определяет длину проводимости сквозных контактных переходов) практически не масштабируется, так как толщина слоёв определяет сопротивление дорожек. Использование вольфрама в качестве металлического межслойного контакта приводит к ещё большему увеличению сопротивления.

Показано, что в процессе технологического масштабирования ИС с пропорциональным уменьшением размеров элементов наблюдается падение максимально допустимой плотности тока. Фактически, максимально допустимая плотность тока падает ниже значения, прогнозируемого ITRS. Например при технологических нормах 22 нм пропускная способность по току локальных контактных переходов в три раза меньше прогнозируемой по ITRS максимально допустимой плотности тока. Из таблицы, в которой сравниваются свойства единичной УНТ и медных контактных переходов соизмеримых размеров, видно, что пропускная способность по току единичной УНТ намного больше, чем у медных контактных переходов.

В ряде работ представлены результаты синтеза массивов из параллельных УНТ, сформированных внутри контактных переходных отверстий [12, 14, 47–50].

На рисунке 9 сравниваются сопротивления массива УНТ (с совершенными контактами) и медных контактных переходов для трёх технологических норм: 45, 30 и 22 нм. Массив УНТ, состоящий из одностенных УНТ

Таблица. Электрические и термические свойства УНТ и медных контактных переходов [46]

Параметр	Единичная УНТ	Медный контактный переход размером 22 нм
Сопротивление, Ом	$6,5 \times 10^3$	4
Максимальная плотность тока, A cm ⁻²	$\sim 1 \times 10^9$	$\sim 1 \times 10^7$
Температурный коэффициент сопротивления, °C ⁻¹	$-1,5 \times 10^{-3}$	$+4 \times 10^{-3}$
Теплопроводность, Вт мК ⁻¹	6600	400

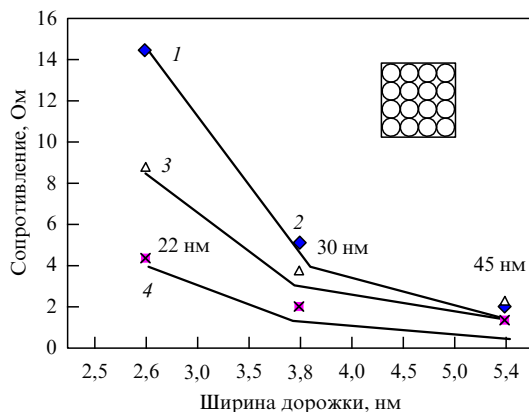


Рис. 9. Сравнение сопротивления контактных переходов на основе массива УНТ с плотной упаковкой, как показано на вставке (3 — УНТ, 4 — МСНТ), и медных контактных переходов (1 — немасштабированные, 2 — масштабированные) для трёх технологических норм: 45, 30 и 22 нм.

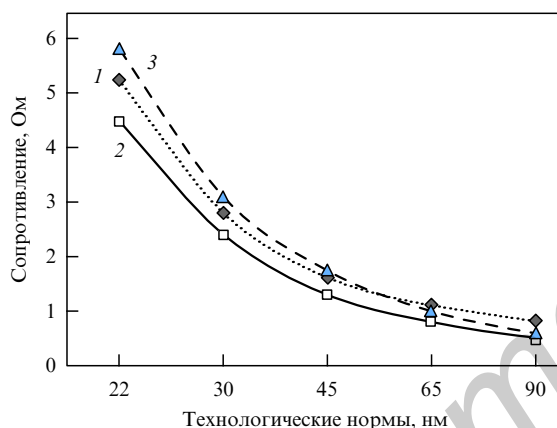


Рис. 10. Сравнение сопротивления обычных медных контактных переходов (1) с совершенными (2) и несовершенными (3) контактами на основе массива одностенных УНТ при различных технологических нормах.

диаметром 1 нм, показывает лучшие характеристики по сравнению с медными контактами. Массивы, сформированные из многостенных УНТ, демонстрируют сопротивления, идентичные "оптимистически" масштабированным медным контактам. На рисунке 10 сравниваются сопротивления обычных медных контактных переходов с контактами на массиве одностенных УНТ при различных технологических нормах. В случае несовершенных (реальных) контактов металл–УНТ появляется дополнительное контактное сопротивление порядка 1 кОм на каждый УНТ-контакт. Как видно из рис. 9 и 10, из-за высокой плотности упаковки УНТ в массиве их сопротивление сравнимо с медными контактами, но они имеют более высокую пропускную способность по току, устраняя тем самым большинство ограничений при масштабировании металлических межсоединений.

Другое достоинство УНТ-контактов — их отрицательный температурный коэффициент сопротивления [51], что делает их чрезвычайно перспективными для высокотемпературных применений. Авторы работы [52] сообщают о высокой надёжности и пропускной способ-

ности по току МСНТ, которые сохраняли свои свойства (структурные и электрические) при плотности тока 10^9 А см⁻² и температуре 250 °С в течение двух недель.

Теоретически показано [53], что МСНТ диаметром 50 и 100 нм потенциально способны увеличить плотность всей системы межсоединений (плотность дорожек и межуровневых контактных переходов) на 50 и 100 % соответственно.

4. Заключение

Решение проблем прикладного использования УНТ в значительной степени зависит от качества и методов формирования электродных систем к самим УНТ. В первой части обзора показано, что полное сопротивление УНТ можно представить как сумму трёх составляющих: теоретического сопротивления идеальной одномерной системы (УНТ), сопротивления рассеяния и сопротивления контакта металл–нанотрубка, обусловленного несовершенством этой границы раздела. Сопротивление отдельных нанотрубок в основном определяется собственными дефектами и оказывается слишком высоким для многих практических применений. При использовании пучков нанотрубок удается существенно снизить сопротивление УНТ-структур.

Контактное сопротивление металл–УНТ изменяется под воздействием температуры, давления, излучения (т.е. внешних условий) и, кроме того, зависит от свойств и условий получения самих УНТ. Характер проводимости контактов и структуры металл–УНТ–металл также зависит от многих, в том числе от вышеперечисленных, факторов.

Рассмотрены общие закономерности изменения этого параметра от внешних воздействий, что позволяет определить методы его уменьшения. Показано, что после кратковременного высокотемпературного отжига контактное сопротивление металл–УНТ уменьшается на несколько порядков величины, становится долговременно стабильным и составляет десятки-сотни Ом. Считается, что улучшение контактных свойств (формирование омического контакта) обусловлено формированием карбида металла на границе раздела металл–УНТ.

Рекомендуется выполнять планаризацию (сглаживание микрорельефа поверхности) УНТ в массиве и снимать оксидный слой с кончиков нанопроволок или УНТ бомбардировкой ионами аргона перед нанесением контактов или измерениями с помощью зондов. Следует также учитывать сопротивление точечного контакта анализатора на основе атомного силового микроскопа (зонд–УНТ), которое может давать существенный вклад в измеряемое значение.

Полезным может оказаться использование в качестве электродных материалов сплавов, сверхпроводников и гетеропереходов или металлов, легированных определёнными примесями. Немаловажной является конструкция контакта, в том числе её размерные параметры, и конструкция всей структуры металл–УНТ–металл в целом.

Проведённый анализ показывает, что существует множество конструктивно-технологических возможностей для создания хороших омических контактов к УНТ (МСНТ) и нанопроволокам, что, в свою очередь, является ключевым моментом для разработки приборов электроники, спинтроники и оптоэлектроники.

Во второй части обзора показано, что многочисленными преимуществами УНТ делают их наилучшим материалом для современной полупроводниковой технологии ИС — они обладают существенно более высокой надёжностью при нанометровых проектных нормах и позволяют значительно увеличить тактовые частоты ИС. Многие из современных микросхем уже выпускаются на основе процесса с соблюдением норм проектирования в 90 нм. К 2010 г. проектные нормы для микросхем ужесточатся до 45 нм, а к 2013 г. — до 32 нм. Таковы прогнозы International Technology Roadmap for Semiconductors, отраслевой группы "Semiconductor Industry Assoc.", которая анализирует и помогает устанавливать стандарты для отрасли производства микросхем.

Достаточно высокая проводимость и термическая стабильность УНТ-структур позволяют обеспечивать высокую пропускную способность по току (плотность тока — до 10^{10} А см⁻²) и делают УНТ-контактные переходы единственной альтернативой в многоуровневых системах межсоединений с нанометровыми проектными нормами (до 22 нм). Таким образом, проводящие нанотрубки в качестве проводников в нанoeлектронных приборах и ИС позволят пропускать токи огромной плотности — на три-четыре порядка больше, чем обычные проводники, — при этом не нагреваясь.

Список литературы

- Li J et al. *Appl. Phys. Lett.* **75** 367 (1999)
- Елецкий А В *УФН* **172** 401 (2002) [Eletsckii A V *Phys. Usp.* **45** 369 (2002)]
- Jung H Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **90** 153114 (2007)
- Kim S J *Письма в ЖТФ* **31** (14) 34 (2005) [*Tech. Phys. Lett.* **31** 597 (2005)]
- Новиков Ю А, Раков А В, Тодуа П А *Труды ИОФАН им. А.М. Прохорова* **62** 3 (2006)
- Endo M et al. *Carbon* **33** 873 (1995)
- Sinnott S B et al. *Chem. Phys. Lett.* **315** 25 (1999)
- Helveg S et al. *Nature* **427** 426 (2004)
- Меуярпан М, in *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* (Ed. H S Nalwa) Vol. 1 (Stevenson Ranch, Calif.: Am. Sci. Publ., 2004) p. 581
- Левашов Е А и др., в сб. *Трудов Второй Всеросс. конф. по наноматериалам "НАНО 2007"* (Новосибирск, 2007) с. 335
- Zhu W G, Kaxiras E *Appl. Phys. Lett.* **89** 243107 (2006)
- McEuen P L, Fuhrer M S, Hongkun P *IEEE Trans. Nanotechnol.* **1** (1) 78 (2002)
- Ebbesen T W et al. *Nature* **382** 54 (1996)
- Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Avouris Ph (Eds) *Carbon Nanotubes* (Berlin: Springer, 2001)
- Wei B Q et al. *Appl. Phys. Lett.* **79** 1172 (2001)
- Hashishin T, Tono Y, Tanaki J *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 333 (2006)
- Jang W Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **84** 1177 (2004)
- Anantram M P, Datta S, Xue Y *Phys. Rev. B* **61** 14219 (2000)
- Mingo N, Han J *Phys. Rev. B* **64** 201401 (2001)
- Nihei M et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 1856 (2004)
- Li J et al. *Appl. Phys. Lett.* **82** 2491 (2003)
- Rosen R et al. *Appl. Phys. Lett.* **76** 1668 (2000)
- Lee R S et al. *Nature* **388** 255 (1997)
- Kociak M et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 2416 (2001)
- Tang Z K et al. *Science* **292** 2462 (2001)
- Takesue I et al. *Phys. Rev. Lett.* **96** 057001 (2006)
- Stampfer C et al. *Nano Lett.* **6** 233 (2006)
- Dujardin E *Appl. Phys. Lett.* **87** 193107 (2005)
- Bauerdick S et al. *J. Vacuum Sci. Technol B* **24** 6 3144 (2006)
- Zhang Y et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 4878 (2006)
- Huang B R et al. *J. Appl. Phys.* **17** 88 (2001)
- Won Bong Choi, Wanjun Park et al., in *Carbon Nanotube for Nanoelectronics: International Conference IEEE-Nano 2003 August 12–14 San Francisco, CA, 2003*
- Lee J-O et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 1953 (2000)
- Kawano T et al. *Appl. Phys. Lett.* **89** 163510 (2006)
- Xing Y J et al. *Appl. Phys. Lett.* **87** 263117 (2005)
- Erts D et al. *J. Phys. Chem. B* **110** 820 (2006)
- Dohn S, Mølhav K, Bøggild P *Sensor Lett.* **3** 300 (2005)
- Тарасов М и др. *Письма в ЖЭТФ* **84** 5 325 (2006) [Тарасов М et al. *JETP Lett.* **84** 267 (2006)]
- Naemi A, Sarvari R, Meindl J D *IEEE Electron Dev. Lett.* **26** 84 (2005)
- White C T, Todorov T N *Nature* **393** 240 (1998)
- Nihei M et al., in *Proc. IEEE Int. Interconnect Tech. Conf., 2005, Burlingame, CA*, p. 234
- Hjortstam O et al. *Appl. Phys. A* **78** 1175 (2004)
- Jun L, Meyya M, "Carbon nanotube interconnect", US Patent 7094679 (2006)
- Gstrein Florian et al., "Carbon nanotube interconnect contacts", US Patent 20060281306 (2006)
- Пустовалов К *Новости науки и технологий* (1(4)) (2006)
- Navin Srivastava, Kaustav Banerjee, in *Proc. of the 21st Inter. VLSI Multilevel Interconnect Conf. (VMIC), Sept. 29–Oct. 2 (Waikoloa, HI, 2004)* p. 393
- Kreupl F et al. *Microelectron. Eng.* **64** 399 (2002)
- Graham A P et al. *Diamond Relat. Mater.* **13** 1296 (2004)
- Меуярпан М et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **12** 205 (2003)
- Воробьева А И, Прудникова Е Л, Шулицкий Б Г *Нано- и микросистемная техника* (9) 39 (2007)
- Wong V T S, Li W J *ISCAS (The IEEE International Symposium on Circuits and Systems) 2003* **4** 844 (2003)
- Wei B Q, Vajtai R, Ajayan P M *Appl. Phys. Lett.* **79** 1172 (2001)
- Naemi A, Sarvari R, Meindl J D, in *Proc. IEEE Int. Interconnect Tech. Conf. San Diego, California, 2006* p. 201

Carbon nanotube electrode systems and methods of their fabrication

A.I. Vorob'eva

Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics
ul. P. Brovka 6, 220013, Minsk, Belarus
E-mail: nil-4-2@bsuir.unibel.by

Techniques for fabricating electrode systems for carbon nanotubes used as nanoelectronic device elements are reviewed. Ways of decreasing the specific resistance of electrodes and contact resistance in metal-nanotube structures are examined. Advances in and prospects for using nanotubes as contacts in future ULSI interconnects are discussed.

PACS numbers: 73.63.Fg, 85.35.Kt, **85.40. – e**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903b.0243

Bibliography — 53 references

Received 11 July 2008, revised 17 September 2008

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (3) 243–253 (2009)

Physics – Uspekhi **52** (3) (2009)