

## К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов

© А.Н. Андреев, М.Г. Растегаева, В.П. Растегаев, С.А. Решанов

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 декабря 1997 г. Принята к печати 23 декабря 1997 г.)

Предложена разновидность конфигурации контактных площадок с радиальной геометрией, имеющая ряд преимуществ при определении переходного сопротивления омических контактов ( $\rho_c$ ) изготовленных к подложкам и слоям полупроводника с высокой проводимостью. Рассмотрены различные варианты ее применения как в методе TLM, так и в методе, основанном на численном расчете сопротивления полупроводника с учетом эффекта растекания. Показано, что методы, основанные на использовании TLM, позволяют получить оценку "сверху" величины удельного переходного сопротивления омических контактов в подложкам, а также проведены расчеты возникающей при этом погрешности в зависимости от параметров полупроводника и контакта. Такая оценка является хорошим начальным приближением при определении точного значения  $\rho_c$  посредством численных расчетов сопротивления полупроводника. Полученные результаты использованы при исследовании удельного сопротивления омических контактов, изготовленных на основе никеля к подложкам *n*-6H-SiC.

### 1. Введение

Разработка корректных процедур измерения удельного переходного сопротивления омических контактов ( $\rho_c$ ) играет важную роль в технологии полупроводниковых приборов. Обычно для определения величины  $\rho_c$  зондовыми методами проводятся измерения полного сопротивления  $R_t$  между планарно расположенными контактными площадками, которое зависит как от сопротивления контакта, так и от сопротивления полупроводника. Поэтому одной из основных задач при расчете переходного сопротивления омических контактов является определение вклада, вносимого полупроводниковым материалом в величину  $R_t$ , который существенно зависит от выбранной конфигурации контактных площадок и определяется процессами растекания тока между ними. Учет процессов растекания в общем случае достаточно сложен и большинство методик определения  $\rho_c$  основано на упрощении конфигурации системы, в которой проводятся измерения.

Наиболее распространено измерение переходного сопротивления контактов в предельном случае тонких слоев полупроводника, электрически изолированных от подложки, например, *p-n*-переходом. В этих условиях задача определения сопротивления полупроводника и, соответственно,  $\rho_c$  решается в рамках одномерной модели протекания тока. Одним из таких методов является TLM (transmission line method) [1–4]. Наиболее удобны модификации TLM, использующие радиальную геометрию контактных площадок [3,4], так как при этом исключается необходимость дополнительного профилирования структур с целью устранения нежелательных эффектов, связанных с протеканием тока на краях контактных площадок [4]. К настоящему времени для этих методов выявлены и оценены факторы, обуславливающие ошибки в измерениях контактного сопротивления, например, влияние размера контактных площадок и рас-

стояния между ними [5], влияние конечного сопротивления растекания по материалу контактного покрытия [5,6]. С учетом этих факторов применение TLM позволяет корректно определять достаточно низкие контактные сопротивления ( $\rho_c \sim 10^{-6} - 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>). Отметим, что в случае низкоомных омических контактов, изготовленных к слоям полупроводника с высокой проводимостью, величина  $R_t$  может быть достаточно малой. С учетом небольшого размера контактных площадок измерения таких величин является сложной задачей. Так как, например, для размещения токовых и потенциальных зондов на контактной площадке малого радиуса необходимы специальные приемы (см., например, [3]). Вследствие этого процедура измерения удельного контактного сопротивления существенно усложняется. Кроме того, в этом случае возникает необходимость измерения малых падений напряжения при высоких плотностях тока. Эти факторы ведут к увеличению погрешности определения  $\rho_c$  [7,8].

Анализ протекания тока значительно усложняется для слоев полупроводника, толщина которых сравнима или превышает характерные размеры контактных площадок, так как отсутствие аналитических выражений в этом случае ведет к необходимости применения численных методов. Примером таких численных расчетов, выполненных с использованием различных моделей и учитывающих неоднородное распространение тока по объему полупроводника, являются работы [9,10]. Следует отметить, что процедура измерения контактного сопротивления на подложках предъявляет более жесткие требования и к геометрическим размерам системы контактных площадок, чем в случае тонких слоев полупроводника, в силу более низких величин  $R_t$ .

Отметим, что наряду с необходимостью возможно более точного определения величины  $\rho_c$  во многих практически важных случаях оказывается достаточным получить информацию о том, что переходное сопроти-

вление контактов не превышает некоторой приемлемой величины (т. е. оценку "сверху") с использованием более простой методики.

В настоящей работе для решения этих задач предложена разновидность радиальной геометрии контактных площадок и рассмотрены различные варианты ее применения в методе TLM и в методе, основанном на численном расчете сопротивления полупроводника с учетом эффекта растекания. Полученные результаты использованы при исследовании удельного сопротивления омических контактов, изготовленных на основе никеля к подложкам *n*-6H-SiC.

## 2. Геометрия контактных площадок

Для определения величины  $\rho_c$  в работе [3] был предложен шаблон, состоящий из концентрически расположенных контактных площадок, меньшая из которых имеет радиус  $r_1$ , а большая — внутренний радиус  $r_2$  (рис. 1). На одном образце изготавливается несколько таких контактных площадок, при этом внутренние площадки имеют фиксированный радиус  $r_1 = \text{const}$ , а величина  $r_2$  различна. В рассмотренном в [3] случае тонких слоев для определения удельного контактного сопротивления и удельного сопротивления слоя полупроводника (sheet resistance)  $R_s$  методом TLM использовалась совокупность значений сопротивлений  $R_t$ , измеренных между этими контактными площадками. Такая геометрия требует достаточно высокой однородности контактного сопротивления по площади образца, однако она более удобна по сравнению с системой концентрических колец, предложенной в [4], с той точки зрения, что при малой величине  $R_s$  величина  $R_t$  будет выше сопротивления, измеряемого между двумя внешними кольцами в схеме [4], за счет большего вклада в  $R_t$  контактного сопротивления площадки малого радиуса  $r_1$ .

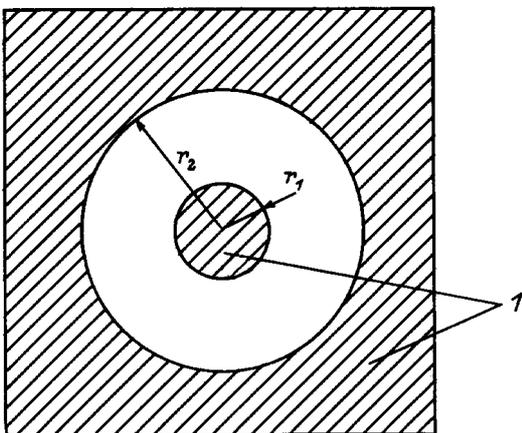


Рис. 1. Фрагмент шаблона с радиальной симметрией для определения переходного сопротивления омических контактов. 1 — контактное покрытие;  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы контактных площадок.

В качестве альтернативного варианта рассмотрим геометрию контактных площадок, аналогичную предложенной в [3], но радиусы контактных площадок  $r_1$  и  $r_2$  выберем таким образом, чтобы выполнялось условие:  $\ln(r_2/r_1) = C$ , где  $C$  — постоянная величина. Проведем сравнительный анализ методик определения удельного контактного сопротивления, основанных на использовании этих двух геометрий, для омических контактов, изготовленных как к тонким слоям полупроводника, так и к подложкам. Для расчетов значения  $r_1$  и  $r_2$  выберем следующим образом: в первом случае диапазон изменения  $r_2$  — 50–250 мкм при фиксированном значении  $r_1 = 20$  мкм; во втором диапазон изменения  $r_1$  — 10–30 мкм при  $\ln(r_2/r_1) = 2$ . Выбранные значения достаточно типичны, так как уменьшение  $r_1$  существенно затрудняет процедуру измерений, а увеличение  $r_1$  при малых значениях  $\rho_c$  нежелательно вследствие уменьшения вклада переходного сопротивления контактов в величину  $R_t$ .

## 3. Основные соотношения для случая тонких слоев полупроводника

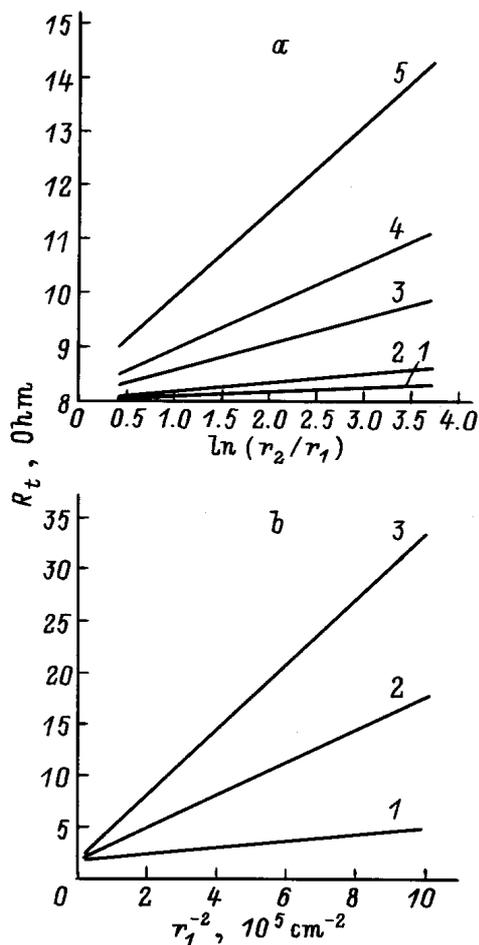
В рамках модели TLM сопротивление между контактными площадками определяется следующим образом<sup>1</sup> [3,4]:

$$R_t = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{R_s}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_1} \frac{I_0(\alpha r_1)}{I_1(\alpha r_1)}, \quad (1)$$

где  $R_t$  — полное сопротивление, измеряемое между контактными площадками;  $R_s$  — удельное сопротивление слоя полупроводника;  $r_1$  и  $r_2$  — внешний и внутренний радиусы соответствующих контактных площадок (рис. 1);  $I_0(\alpha r_1)$  и  $I_1(\alpha r_1)$  — модифицированные функции Бесселя 0 и 1 порядков соответственно;  $\alpha = (R_s/\rho_c)^{1/2}$ ;  $\rho_c$  — удельное переходное сопротивление омических контактов. Очевидный способ определения  $\rho_c$  с использованием выражения (1), реализованный в [3], состоит в том, что при фиксированном значении  $r_1$  строится зависимость измеренного сопротивления  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$ . Наклон полученной прямой определит при этом величину  $R_s$ , а отсечка (в совокупности с  $R_s$ ) — величину  $\rho_c$ .

Отметим, что изменение  $R_t$  обусловлено при этом только изменением  $r_2$  и, как следствие, при малых  $R_s$  диапазон изменения  $R_t$  невелик. Такая ситуация увеличивает погрешность определения  $\rho_c$  и требует хорошей статистики измерений. Кроме того, даже для проведения тестовых измерений необходимо использовать токовые и потенциальные зонды. В противном случае величина  $\rho_c$  будет завышена за счет наличия сопротивления зонд-контактное покрытие, так как она определяется

<sup>1</sup> В выражение (1) не включены слагаемые, влиянием которых можно пренебречь при соответствующем выборе геометрических размеров системы контактных площадок [4,5].



**Рис. 2.** *a* — расчетные зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  для случая эпитаксиальных слоев при  $\rho_c = 1 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ . Цифры соответствуют зависимостям, построенным при следующих значениях  $R_s$  (Ом на квадрат): 1 — 0,5, 2 — 1, 3 — 3, 4 — 5, 5 — 10. *b* — расчетные зависимости  $R_t$  от  $(r_1^{-2})$  для случая эпитаксиальных слоев при  $R_s = 5 \text{ Ом}$  на квадрат. Цифры соответствуют зависимостям, построенным при следующих значениях  $\rho_c$ ,  $\text{Ом} \cdot \text{см}^2$ : 1 —  $1 \times 10^{-5}$ , 2 —  $5 \times 10^{-5}$ , 3 —  $1 \times 10^{-4}$ .

из отсечки аппроксимирующей прямой зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$ .

Указанных недостатков можно легко избежать, если шаблон для формирования контактных площадок будет сконструирован таким образом, чтобы величина  $r_1$  изменялась, а значение  $\ln(r_2/r_1)$  оставалось постоянным. Если  $\ln(r_2/r_1) = C = \text{const}$ , то зависимость  $R_t$  от  $r_1$  принимает вид

$$R_t = \frac{CR_s}{2\pi} + \frac{R_s}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_1} \frac{I_0(\alpha r_1)}{I_1(\alpha r_1)}. \quad (2)$$

При достаточно малых  $r_1$  основной вклад в  $R_t$  будет вносить контактное сопротивление и относительное изменение  $R_t$  при измерениях возрастет. На рис. 2 приведены расчетные зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  и  $R_t$  от  $r_1^{-2}$

при вышеуказанных параметрах шаблонов. Из рис. 2 видно, что во втором случае диапазон изменения  $R_t$  существенно (в несколько раз) расширяется. Значения  $\rho_c$  и  $R_s$  из набора экспериментальных точек ( $R_{ti}, r_{1i}$ ) ( $i = 1, \dots, N$ ;  $N$  — число измерений) могут быть легко определены, например, посредством минимизации функции невязки  $\phi(\rho_c, R_s)$ , построенной по критерию выравнивания Гаусса [11]:

$$\phi(\rho_c, R_s) = \sum_{i=1}^N [R_{ti}(\rho_c, R_s) - R_{ti}]^2. \quad (3)$$

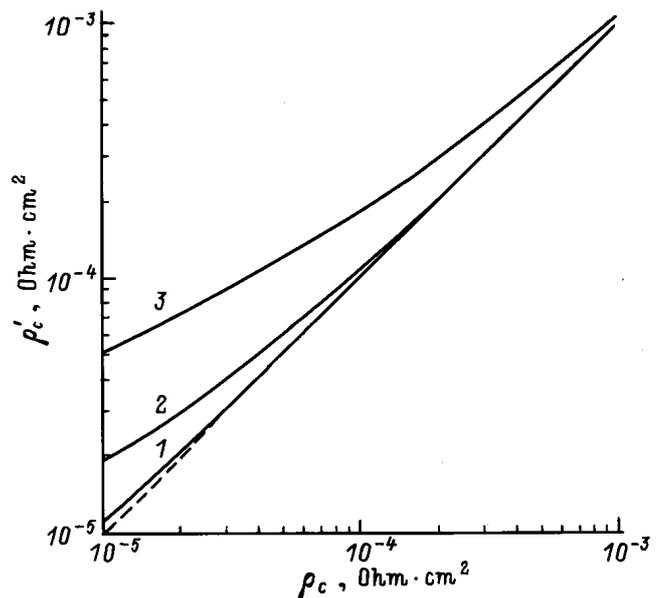
При выполнении условия

$$\alpha r_1 \ll 1 \quad (4)$$

справедливо асимптотическое соотношение  $I_0(\alpha r_1)/I_1(\alpha r_1) \rightarrow 2/(\alpha r_1)$ , и выражение (2) может быть записано следующим образом:

$$R_t = \frac{CR_s}{2\pi} + \frac{r_c}{\pi r^2}. \quad (5)$$

Таким образом, при выполнении условия (4) зависимость  $R_t = R_t(r_1^{-2})$  является линейной. Наклон аппроксимирующей прямой определяет  $\rho_c$  и при постоянном сопротивлении измерительных зондов их сопротивление не искажает величину  $\rho_c$ . При  $\alpha r_1 \geq 1$  применение выражения (5) дает оценку "сверху" ( $\rho'_c$ ) величины удельного контактного сопротивления ( $\rho_c$ ) (рис. 3).



**Рис. 3.** Отклонение величины переходного сопротивления омических контактов, полученной с использованием приближения (5) ( $\rho'_c$ ), от значения  $\rho_c$ , определяемого выражением (2) при  $\alpha r_1 \geq 1$  для рассматриваемого шаблона. 1, 2 и 3 соответствуют следующим значениям  $R_s$  (Ом на квадрат: 10, 100 и 1000).

#### 4. Применение численных расчетов сопротивления полупроводника при определении величины удельного контактного сопротивления

Для расчета удельного сопротивления омических контактов, изготовленных к слоям (или подложкам) произвольной толщины, с использованием рассматриваемой геометрии контактных площадок может быть применен метод, реализованный в [10]. Этот метод основан на расчете распределения тока в исследуемой структуре путем дискретизации полупроводника на конечное число элементарных объемов, в пределах каждого из которых электрическое поле можно считать однородным. Каждому элементарному объему ставятся в соответствие определенные сопротивления, из которых с учетом радиальной симметрии контактных площадок формируется эквивалентная схема исследуемой структуры (рис. 4). Таким образом, определение полного сопротивления  $R_t$  сводится к решению задачи о протекании тока по электрической цепи, составленной из дискретных резисторов. Для полупроводниковых кристаллов средних сингоний (например, гексагональных модификаций карбида кремния) расчет может быть произведен с учетом фактора анизотропии проводимости. Описанная модель ранее была использована при определении удельного сопротивления омических контактов, изготовленных к тонким эпитаксиальным слоям. Полученные результаты совпали с результатами, полученными методом TLM [10].

Применительно к рассматриваемым конфигурациям контактных площадок значения удельного переходного сопротивления  $\rho_c$  и удельного сопротивления полупроводника  $\rho$  могут быть определены с использованием

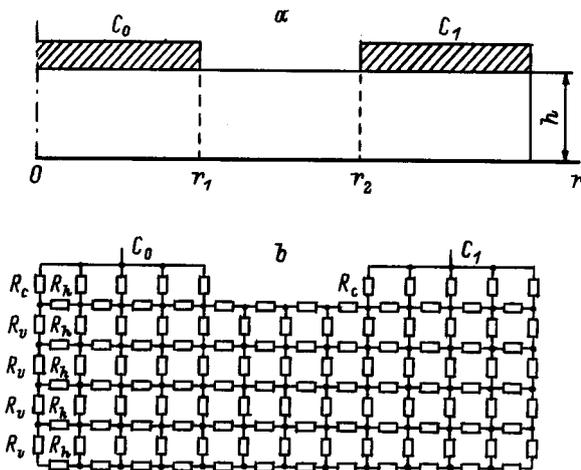


Рис. 4. Исследуемая структура (а) и ее эквивалентная схема, использованная для численных расчетов сопротивления полупроводника (б).  $C_0$  и  $C_1$  — контактные площадки;  $r_1$  и  $r_2$  — их радиусы;  $h$  — толщина подложки;  $R_h$ ,  $R_v$  и  $R_c$  — сопротивления, соответствующие элементарным объемам полупроводника и контактного покрытия. Для изотропного полупроводника  $R_h = R_v$ .

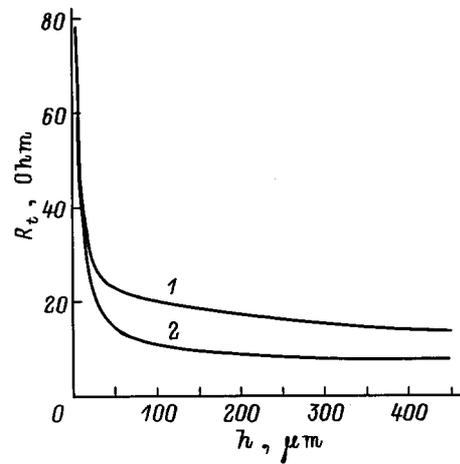


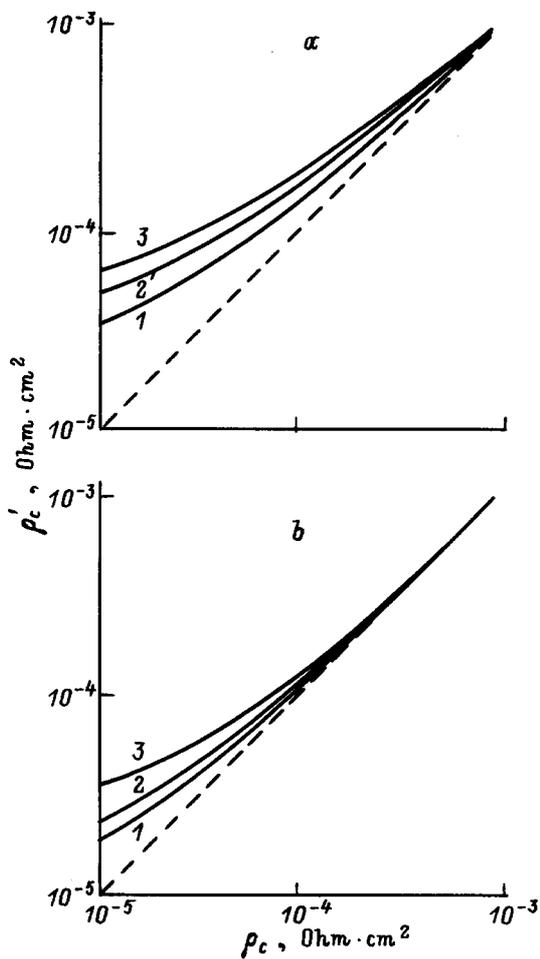
Рис. 5. Расчетные зависимости полного сопротивления  $R_t$  от толщины подложки при  $\rho_c = 5 \times 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ;  $\rho = 0.1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;  $r_1 = 15 \text{ мкм}$ ;  $\ln(r_2/r_1) = 2$  для изотропного полупроводника. Кривая 1 получена с использованием численных расчетов, кривая 2 — методом TLM ( $R_s = \rho/h$ ).

водника  $\rho$  могут быть определены с использованием выражения (3) с той разницей, что для функции  $R_t(\rho_c, \rho)$  нет аналитического выражения и она рассчитывается численными методами. Следует отметить, что поиск минимума функции невязки может быть достаточно трудоемко при отсутствии удачного начального приближения.

Рассмотрим изменение сопротивления между контактными площадками при увеличении толщины эпитаксиального слоя (или подложки). Очевидно, что при постоянном значении удельного контактного сопротивления изменение  $R_t$  обусловлено изменением сопротивления растекания по полупроводнику. Характер этого изменения будет существенно зависеть от соотношения сопротивлений  $R_h$  и  $R_v$  (рис. 4). Результаты численных расчетов зависимости  $R_t$  от  $h$  для изотропного ( $R_h = R_v$ ) кристалла представлены на рис. 5 (кривая 1).

#### 5. Использование методов TLM для оценки сопротивления омических контактов, изготовленных к подложкам

Определение сопротивления подложки на основе модели TLM, вообще говоря, не является корректной процедурой, о чем свидетельствуют различия между кривыми 1 и 2, приведенными на рис. 5. Кривая 2 рассчитана в TLM приближении при тех же параметрах структуры, что и кривая 1, принимая во внимание соотношение  $R_s = \rho/h$ . Эти различия обусловлены тем, что любая круговая цилиндрическая поверхность, описанная вокруг оси, проходящей через начало координат и перпендикулярной поверхности, не является эквипотенциальной за счет неоднородного распределения тока по толщине полупроводника под контактными площадками. Вследствие



**Рис. 6.** Сравнение результатов расчета величины переходного сопротивления омических контактов на основе двумерной модели (рис. 4) ( $\rho_c$ ) и методом TLM ( $\rho_c'$ ) в случае использования: *a* — зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$ ; *b* — зависимости  $R_t$  от  $r_1^{-2}$ . 1, 2 и 3 соответствуют следующим значениям  $\rho$ , Ом · см: 0.1, 0.2 и 0.3.

этого, определяемая методом TLM величина удельного контактного сопротивления окажется завышенной. Однако, влияние этого фактора уменьшается, если втекание тока в полупроводник определяется главным образом переходным сопротивлением контактов. В TLM модели этому приближению соответствует условие  $\alpha r_1 \ll 1$ .

Для оценки величины погрешности, обусловленной использованием TLM приближения в рассматриваемых случаях, был проведен сравнительный расчет. При заданных значениях  $\rho_c$  и  $\rho$  по методике, изложенной в разделе 4, рассчитывались зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  и  $1/r_1^2$ , которые затем аппроксимировались аналитическими выражениями (1), (2), (5), даваемыми моделью TLM для соответствующих случаев. На их основе определялись величины удельного контактного сопротивления  $\rho_c'$ . Полученные зависимости представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что различия между значениями  $\rho_c$  и  $\rho_c'$  существенно зависят от выбора конфигурации и

размеров контактных площадок, а также от величины удельного сопротивления полупроводника. Для рассматриваемых шаблонов использование зависимости  $R_t$  от  $r_1^{-2}$  дает более точную оценку удельного контактного сопротивления. Для контактов, изготовленных к подложкам с удельным сопротивлением 0.1–0.2 Ом · см, измерения этим методом могут быть произведены вплоть до величины  $\rho_c = 5 \times 10^{-5}$  Ом · см<sup>2</sup>. При таком значении  $\rho_c$  погрешность не превышает 15–20% и существенно уменьшается при увеличении  $\rho_c$ . В отличие от этого, определение  $\rho_c$  по зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  вносит существенную погрешность, начиная с величин  $\rho_c = (1-5) \times 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>, и такой шаблон контактных площадок может быть использован только для получения очень грубой оценки. Величина погрешности будет уменьшаться при уменьшении удельного сопротивления полупроводника.

Таким образом, используя выражения, полученные в TLM приближении, легко получить оценку "сверху" удельного контактного сопротивления. Величина отклонения при этом существенно зависит от геометрии контактных площадок и параметров полупроводника.

## 6. Измерение удельного сопротивления омических контактов, изготовленных на основе никеля к подложкам *n*-6H-SiC

Омические контакты формировались на подложках 6H-SiC *n*-типа проводимости, выращенных методом Лели, с концентрацией нескомпенсированных доноров  $3-5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, удельным сопротивлением 0.1–0.3 Ом · см и толщиной 450 мкм. На первом этапе на поверхность подложки, предварительно прогретую до 300°C, методом электронно-лучевого испарения в вакууме наносился никель. Затем осуществлялся высокотемпературный отжиг структур. Температуры отжига находились в диапазоне 900–1300°C. Контактные площадки требуемой геометрии формировались методом фотолитографии. Более подробно технология формирования омических контактов и результаты исследования структуры и состава контактного покрытия изложены в [12,13].

Результаты исследования удельного контактного сопротивления с использованием различных методик представлены в таблице. Следует отметить, что кристаллы карбида кремния политипа 6H имеют существенную анизотропию проводимости: отношение удельных сопротивлений в направлении гексагональной оси *C* и в плоскости, ей перпендикулярной (фактор анизотропии), составляет  $\rho_v/\rho_h = 3.7$  [14,15]. Результаты расчетов удельного переходного сопротивления омических контактов, проведенных как с учетом, так и без учета фактора анизотропии, приведены в двух последних рядах таблицы. Отметим, что определение величины  $\rho_c$  в TLM приближении с использованием геометрии с постоянным

**Таблица.** Значения удельного переходного сопротивления омических контактов на основе никеля, изготовленного на С-границе подложек  $n$ -6H-SiC, определенные с использованием различных методик

Метод расчета величины удельного контактного сопротивления $\rho_c$		Значения $\rho_c$ (Ом·см <sup>2</sup> ), соответствующие температуре отжига $T_a$		
		$T_a=800^\circ\text{C}$	$T_a=1000^\circ\text{C}$	$T_a=1200^\circ\text{C}$
Методы на основе	1	$1.6 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-4}$
TLM	2	$1.1 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$
Численный расчет	3	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$
	4	$8.3 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$8.6 \times 10^{-5}$
	5	$1.0 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$9.5 \times 10^{-5}$

*Примечание.* Цифрами обозначены следующие методы определения величины  $\rho_c$ :

- 1 — по линейной аппроксимации зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  при  $r_1 = \text{const}$  (выражение (1));
- 2 — по линейной аппроксимации зависимости  $R_t$  от  $r_1^{-2}$  при  $\ln(r_2/r_1) = \text{const}$  (выражение (5));
- 3 — из зависимости  $R_t$  от  $r_1^{-2}$ , даваемой выражением (2) посредством минимизации функции невязки (3);
- 4 — по результатам численного расчета  $R_t$  без учета анизотропии сопротивления подложки, с последующей минимизацией функции невязки (3);
- 5 — по результатам численного расчета  $R_t$  с учетом анизотропии сопротивления подложки (фактор анизотропии 3.7 [15,15]), с последующей минимизацией функции невязки (3).

Величины погрешности  $\rho_c$ , определенные по величине разброса экспериментальных данных по площади подложки, не превышали 15–20%.

отношением внешнего и внутреннего радиусов контактных площадок дает оценку "сверху" (2, 3 ряда таблицы), практически совпадающую со значениями, полученными при численном расчете (5 ряд таблицы) с учетом фактора анизотропии. Значительно большие различия наблюдаются в случае использования зависимости  $R_t$  от  $\ln(r_2/r_1)$  при значении  $\rho_c = 3.6 \times 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> результаты отличаются в 2.5 раза.

## 7. Заключение

Методы TLM позволяют получить оценку "сверху" величины удельного переходного сопротивления омических контактов, изготовленных на подложках. Величина погрешности существенно зависит от выбранной геометрии контактных площадок и параметров полупроводника. Предложенная геометрия, основанная на построении аппроксимаций (3) или (5) зависимости  $R_t$  от  $r_1^{-2}$ , позволяет определить величину удельного контактного сопротивления или получить ее оценку "сверху" в зависимости от параметров измеряемой структуры. В случае измерения контактного сопротивления на подложках такой метод позволяет обеспечить более точную оценку по сравнению с традиционной методикой. Оценка, проведенная для подложек карбида кремния с удельным сопротивлением 0.1–0.3 Ом·см, показывает, что вплоть до удельных сопротивлений контактов  $\sim 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup> погрешность метода не превышает 15–20%. При более

низких удельных контактных сопротивлениях получаемая оценка является хорошим начальным приближением для определения  $\rho_c$  посредством численных расчетов сопротивления полупроводника. К достоинствам методики относится также расширение диапазона измеряемых величин сопротивления за счет увеличения вклада контактного сопротивления, что повышает достоверность определения  $\rho_c$ .

Работа выполнялась при частичной поддержке Аризонского университета (США) и Schnider Electric Group.

## Список литературы

- [1] В.Я. Нисков. ПТЭ, **1**, 235 (1971).
- [2] H.H. Berger. Sol. St. Electron., **15**, 145 (1972).
- [3] G. Boberg, L. Stolt, P.A. Tove, H. Norde. Physica Scripta, **24**, 405 (1981).
- [4] G.K. Reeves. Sol. St. Electron., **23**, 487 (1980).
- [5] G.S. Martow, M.B. Das. Sol. St. Electron., **25**, 91 (1982).
- [6] J.S. Chen, A. Bashli, M.-A. Nicolet, L. Baud, C. Jaussaud, R. Madar. Mater. Sci. Engin., B, **29**, 185 (1995).
- [7] L.K. Mak, C.M. Rogers, D.C. Northrop. J. Phys. E: Sci. Instrum., **22**, 317 (1989).
- [8] Ю.Д. Чистяков, В.В. Баранов, А.П. Достанко. *Обзоры по электронной технике*. Сер.: *Полупроводниковые приборы* (М., Изд-во ЦНИИ "Электроника", 1973) вып. 7 (143).
- [9] А.М. Стрельчук, Б.Н. Грессеров. Письма ЖТФ, **22**, 1 (1996).
- [10] V. Rastegaev, S. Reshanov, A. Andreev, M. Rastegaeva. *Trans. of the Third Int. High Temperature Conference (USA, 1996)* p. 149.
- [11] И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. *Справочник по математике* (М., Наука, 1980).
- [12] M.G. Rastegaeva, A.N. Andreev, V.V. Zelenin, A.I. Babanin, I.P. Nikitina, V.E. Chelnokov, V.P. Rastegaev. *Proc. Vllth Conf. on Silicon Carbide and Related Materials*, ed. by S. Nakashima et al. (Inst. Phys. Conf. Ser. 142, 1995) p. 581.
- [13] M.G. Rastegaeva, A.B. Andreev, A.A. Petrov, A.I. Babanin, M.A. Yagovkina, I.P. Nikitina. *Abstracts of E-MRS Spring Meeting* (France, 1996) A-VII.3.
- [14] Yu.M. Tairov, Yu.A. Vodakov. *Topics in Applied Physics*, ed. by Pankov (Berlin-Heidelberg-N.Y., 1977) v. 17, p. 31.
- [15] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.В. Семенов, В.И. Соколов. В сб.: *Проблемы физики и технологии широкозонных полупроводников* (Л., 1980) с. 164.

Редактор В.В. Чалдышев

## On calculation of current spreading in the semiconductor under specific contact resistance measurements

A.N. Andreev, M.G. Rastegaeva, V.P. Rastegaev,  
S.A. Reshanov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A modification of contact area pattern with radial geometry has been proposed which has certain advantages when performing specific resistance measurements of ohmic contacts fabricated on the substrates and low resistance epitaxial layers. Applications of this pattern are considered both for TLM and methods based on numerical calculations of semiconductor resistance taking into account the nonuniform distribution of current in the semiconductor volume. It is shown that TLM makes it possible to obtain an "upper" estimation of specific contact resistance values. Errors of such an estimation are calculated also as functions of parameters of the semiconductor and the contact. TLM estimation gives good first approximation when finding an accurate value of  $\rho_c$  of specific contact resistance by numerical methods. Results obtained are used in studying specific resistance of Ni-based ohmic contacts to *n*-6H-SiC.