

(Рисунок 1). Уже в существующем виде метод и прибор позволяют обнаружить момент захлопывания кавитационных пузырей и момент начала следующего цикла их роста. Следовательно, метод дает информацию о времени роста кавитационной области и о времени нахождения пузырей в стадии зародышей. Эта информация, даже в отсутствии данных об абсолютном значении размеров пузырей, уже представляет значительную ценность, как для проверки адекватности моделей кавитационных процессов, так и для целей управления кавитационным процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов, В.А., Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. [Текст] / В.А. Архипов – Томск: издательство Томского университета, 1987 г. – 140 с.
2. Степанова, Б.И. Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. [Текст] / Б.И. Степанов/ – Минск: Наука и техника, 1972 г. – 487 с.
3. Леонов, Г.В. Автоматизация процесса измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы. [Текст] / Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Д.С. Абраменко // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2005 – 2005.
4. Хмелев, В.Н. Способ измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы. [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, И.И. Савин // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. – Бийск, АлтГТУ, 2004.
5. Старыгина, О.В. Особенности нефелометрии при соизмеримости дисперсных частиц с длиной волны излучения. [Текст] / О.В. Старыгина, Ю.А. Галенко, М.О. Сысоева // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (27-29 апреля 2011 г., г. Бийск) / Алт. Гос. Техн. Ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. Техн. Ун-та, 2011. – С. 127-133.

к.т.н., доцент И.И. Савин – Бийский технологический институт, кафедра физики, sii@bti.secna.ru, (3854)368244; д.ф.-м.н., проф. Ю.А. Галенко – Бийский технологический институт, кафедра информатики и вычислительной математики, gal@bti.secna.ru, (3854)435269; аспирант О.В. Старыгина – Бийский технологический институт, кафедра информатики и вычислительной математики, ict@bti.secna.ru, (3854)435329; инженер Е.И. Парфутчик – Бийский технологический институт, кафедра экономики, ep@bti.secna.ru, (3854)435311.

УДК 621.383

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ПРОЦЕССЕ ИХ ОТЖИГА

В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов, А.В. Юрченко, В.И. Юрченко

Проведен анализ процесса отжига омических контактов к полупроводниковым структурам на основе арсенида галлия и его твердых растворов с контролем сопротивления непосредственно в процессе отжига. Приведена эмпирическая формула зависимости приведенного поверхностного сопротивления от температуры. Представлена физическая модель формирования омических контактов.

Ключевые слова: омический контакт, сопротивление, контроль.

Введение

Омические контакты являются важнейшим элементом полупроводниковых приборов и интегральных схем, и их качество в значительной мере определяет эксплуатационную устойчивость и надежность изделий. Наиболее распространенным материалом контакта к структурам на основе арсенида галлия *n*-типа является сплав *AuGe*. Установлено [1,2], что на качество и величину приведенного поверхностного сопротивления ρ_k омических контактов (ОК) влияет режим

термической обработки: длительность отжига t , максимальная температура отжига T , скорости нагрева и охлаждения. Большое влияние оказывает и вид термической обработки; это может быть как традиционная печная обработка, так и обработки с помощью источников некогерентного излучения, лазеров, электронных и ионных пучков. Наиболее важными параметрами, характеризующими процесс отжига, являются:

- морфология поверхности омических контактов,

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

- зависимости приведенного поверхностного сопротивления от температуры и времени отжига $\rho_k(t, T)$.

Морфология поверхности контактов и её неоднородность, как правило, отражает те физико-химические процессы, которые происходят, как в объеме контактов, так и на границе раздела $AuGe - GaAs$. Электронно-микроскопические исследования показывают, что кинетика изменения морфологии омических контактов в процессе отжига представляет собой сложный процесс. Уже после нанесения металлов на $GaAs$, поверхность контактных площадок является неоднородной, содержащей темные участки с повышенной концентрацией Ge (рисунок 1).

В процессе нагрева проходит перераспределение элементов в системе омический контакт-полупроводник, возникает диффузия Au , Ge в $GaAs$, с образованием твердых растворов и химических соединений.

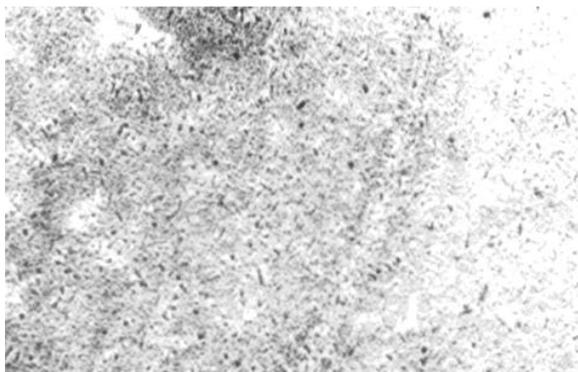


Рисунок 1 – Исходная поверхность контакта $AuGeNi$ после нанесения на $GaAs$. (увеличение 2000)

С ростом температуры эти процессы ускоряются (рисунок 2) и при температуре выше $300^{\circ}C$ начинаются процессы формирования интерметаллических соединений типа $AuGa$, $AuGe$ и другие, подробно описанных в [2,3].

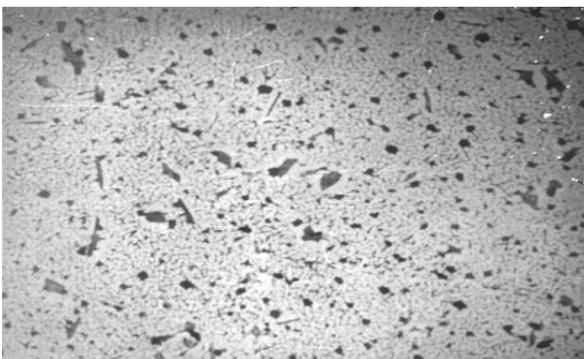


Рисунок 2 – Поверхность контакта $AuGeNi$ в процессе отжига. (Увеличение 2000)

Авторами [4] показано, что размеры темных участков достигают величин $70-90 \mu m$ и представляют, по их мнению, фазу $Ni-Ge-As$. Характер протекания указанных выше процессов во время термического цикла получения омических контактов и определяет их электрофизические параметры. После нагрева и выдержке при максимальной температуре, физические, химические и металлургические процессы продолжают и на стадии охлаждения (рисунок 3).

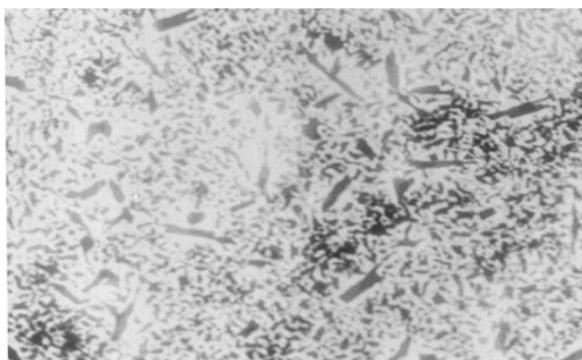


Рисунок 3 – Поверхность контакта $AuGeNi$ после охлаждения. (Увеличение 2000)

Сравнивая морфологию поверхности контактов при температуре отжига (рисунок 1) и после охлаждения можно сделать вывод, что размеры темных участков, содержащих фазу $Ni-Ge-As$, увеличились более чем в два раза.

Очевидно, что контакты нельзя рассматривать как твердые растворы металлов омических контактов и арсенида галлия и, необходимо учитывать, что в результате процессов взаимной диффузии, химических реакций образуются соединения, которые создают сложный по составу промежуточный слой между полупроводником и материалом омических контактов, который и определяет величину приведенного контактного сопротивления. Причем, толщина и состав этого слоя зависит от скорости нагрева-охлаждения, так авторами работы [5] показано, что при «быстром» импульсном отжиге, возможно создание и других «термодинамически» неравновесных интерметаллических соединений вследствие аномально высоких скоростей нагрева-охлаждения системы ОК – арсенид галлия.

Нами получена зависимость величины приведенного сопротивления ρ_k от температуры для двух значений концентрации легирующей примеси в арсениде галлия (рисунок 4), из которой следует, что имеется диапазон температур, в котором достигается наимень-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

шее значение величины приведенного поверхностного сопротивления. Кроме того, величина ρ_k определяется уровнем легирования n -слоя полупроводника, чем выше уровень легирования слоя, тем меньше его сопротивление. Аномальное поведения зависимости R от температуры позволяет осуществить управление процессом формирования омического контакта и остановить его в момент достижения точки минимального сопротивления. Метод контроля параметров процесса отжига с обратной связью по сопротивлению омических контактов ранее был реализован в работе [6] и в дальнейшем доработан с использованием современной компьютерных технологий. Разработанный метод контроля сопротивления в процессе отжига позволяет осуществить управление этим процессом и существенно повысить его производительность.

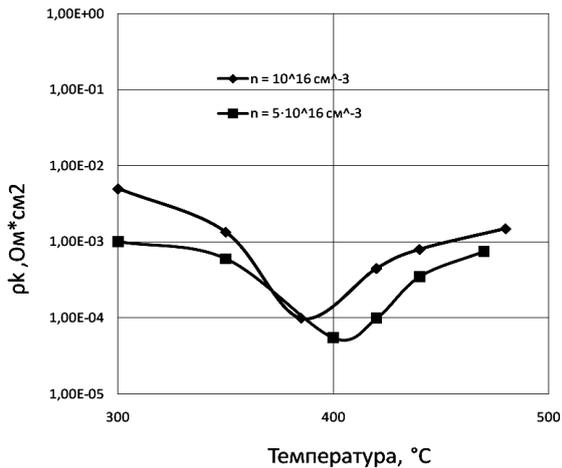


Рисунок 4 – Зависимость приведенного поверхностного контактного сопротивления омического контакта от температуры для двух значений легирующей примеси в арсениде галлия.

В результате проведенных исследований нами установлена зависимость ρ_k от температуры T_ϕ и времени t_ϕ отжига и получена эмпирическая формула (1) следующего вида:

$$\rho_k = A \left(BT_\phi t_\phi + \frac{C}{T_\phi t_\phi} \right) n^\gamma, \quad (1)$$

где $A=(1-5)10^{12} \text{cm}^{-3}$, $\gamma=1 \pm 0,2$. Величины B и C взаимосвязаны и связаны с величинами $t_{\rho_k \text{ min}}$, $T_{\rho_k \text{ min}}$ следующим соотношением (2):

$$\frac{C}{B} = T_{\rho_k \text{ min}} t_{\rho_k \text{ min}} \quad (2)$$

Указанная формула отражает экспериментальную зависимость $\rho_k(t, T)$ с тремя характерными участками. На рисунке 5 представлена изменение полного электрического сопротивления омического контакта $AuGe$ к $GaAs$ диаметром 500 мкм при термообработке в атмосфере азота со скоростью 20 °C/мин. Участок 1 характеризуется монотонным изменением сопротивления до достижения температуры 250-260°C. В этот момент можно говорить о модели омического контакта вида $M-d-GaAs$, где d - сложный по составу окисный промежуточный слой между полупроводником и материалом омических контактов.

На участке зависимости 2 отмечается резкое уменьшение сопротивления, величина которого определяется уровнем легирования арсенида галлия примесью германия, за счет его диффузии из материала контакта и созданием интерметаллических соединений типа $GeAs$. Минимум на зависимости электрического сопротивления контакта от температуры T_ϕ говорит об окончании процесса формирования омического контакта. С материаловедческой точки зрения это означает, что все атомы германия заняли соответствующие узлы в решетке арсенида галлия и создали электрически активные электронно-донорные центры. Для этого участка зависимости более подходит модель омического контакта вида $M-n-GaAs$, где n - легированный германием промежуточный слой между полупроводником и материалом омических контактов, который и определяет величину приведенного контактного сопротивления.

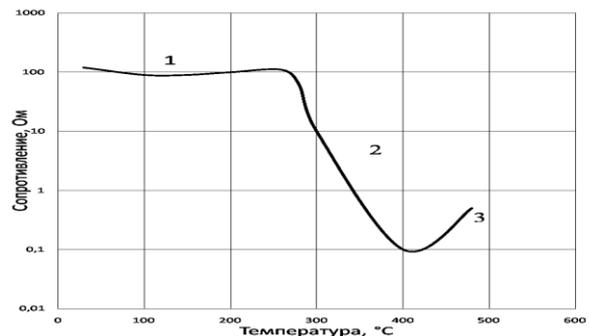


Рисунок 5 – Изменения полного электрического сопротивления омического контакта диаметром 500мкм в процессе термического отжига (скорость нагрева 20 °C/мин).

Участок зависимости 3 характеризуется ростом сопротивления и обусловлен диффузией остальной части атомов золота, галлия и мышьяка к границе контакт-полупроводник и образованием интерметаллических соеди-

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

нений типа $AuGa$, $AuAs$ и других, обладающих высоким сопротивлением. Модель омического контакта в этом случае представляется в виде структуры $M-n+-v-GaAs$, где v -высокоомный слой.

Проведенный анализ формирования омических контактов, их морфологии, характера изменения величины электрического сопротивления показывает сложную кинетику их поведения, в которой участвуют процессы диффузии, растворения, рекристаллизации и образования различных интерметаллических соединений.

Вывод

Метод измерения приведенного поверхностного удельного или полного электрического сопротивления одновременно с контролем температуры термообработки и скорости нагрева и охлаждения непосредственно в процессе технологического цикла формирования омических контактов позволяет обеспечить высокую воспроизводимость электрических параметров омических контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заводчиков В.М. Исследование возможности использования импульсного фотонного отжига в технологии [Текст] / Заводчиков В.М., Дохтуров В.В., Карпович Н.В., Солдатенко К.В. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ.-1993г. №.3 (170).- С. 26-27.
2. Стриха В.И. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике [Текст] / Стриха В.И., Бузанева Е.В. // Радио и связь.- М.: 1987.- С. 178-181.
3. Брянцева Т.А. Термические изменения в области контакта пленки золота с поверхностью монокристаллического арсенида галлия [Текст] / Брянцева Т.А., Волков А.И., Ормонт А.Б. //Электронная Техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.-1976.- №. 2 (100).- С.65-67.
4. Филимонов В.М. Морфологические изменения в омических контактах к арсениду галлия на основе сплава золото – германий в процессе их отжига [Текст] / Филимонов В.М., Юрченко В.И. // Сборник трудов VI Всесоюзного совещания по исследованию арсенида галлия. – Томск- 1987. - Т.2 - С.48.
5. Дохтуров В.В. Кристаллизация сплава золото-германий на поверхности арсенида галлия при импульсной термообработке [Текст] / Дохтуров В.В., Смирнов С.В. // Электронная техника. - Серия 7. Ферритовая техника.-1992.- №.2 (171). - С. 50-51.
6. Отчет по ОКР "Терка" Исследование и разработка технологического процесса и автоматизированной установки импульсного отжига N Госрегистрации Ф28456.-1988.

Руководитель производства В.В. Дохтуров – niipr24@mail.ru, (3822) 555-572; Начальник отдела оптических систем В.И.Юрченко – yur_med@mail.r, (3822) 488-521 – ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», д.т.н., проф. С.В. Смирнов – Томский университет систем управления и радиоэлектроник, кафедра физической электроники, center@ms.tusur.ru, (3822) 485-638, д.т.н., проф А.В. Юрченко – каф. Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета, тел.(3822)-41-89-11, niipr@inbox.ru

УДК 621.385.833

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Е.Ю. Шелковников, А.В. Тюриков, П.В. Гуляев, С.Р. Кизнерцев, С.И. Липанов

В статье рассмотрены особенности помехозащищенного сканирующего туннельного микроскопа для автоматической идентификации наноструктуры поверхности. Представлена структурная схема разработанного микроскопа, приведены основные принципы его работы. Показано использование метода анализа иерархий для окончательной идентификации СТМ-изображений наночастицы с применением аппарата нейронных сетей и нечеткой логики.

Ключевые слова: сканирующий туннельный микроскоп, идентификация СТМ-изображений, система активной виброзащиты, нейронные сети, нечеткая логика.

Введение

Исследования наночастиц кластерных материалов с применением сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) являются важным этапом при создании новых перспек-

тивных материалов. Поскольку СТМ позволяет получать топографические изображения поверхности постоянного туннельного тока (СТМ-топографии), величина которой в каждой точке над поверхностью определяется

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012