

06;07;12

## **Болометрические свойства кремниевых пленочных структур, полученных методом плазмохимического газофазного осаждения**

© В.Ю. Зеров, Ю.В. Куликов, В.Г. Маляров,  
Н.А. Феоктистов, И.А. Хребтов

ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова", С.-Петербург  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 20 января 1997 г.

Сообщается о методике изготовления и результатах исследований неохлаждаемых термочувствительных структур сэндвичного типа на основе аморфных гидрированных пленок кремния. Структуры имеют площадь  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>, сопротивление  $\cong 10$  кОм и температурный коэффициент сопротивления  $\approx 2\%$  К. На частоте 30 Гц при токах  $\approx 1$  мкА избыточный шум превышает тепловой шум сопротивления в 1.7 раза

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих высокие технико-эксплуатационные характеристики многоэлементных инфракрасных приемников на основе неохлаждаемых микроболометров [1–5], является использование в качестве термочувствительных материалов полупроводниковых пленок, имеющих при комнатной температуре температурный коэффициент сопротивления  $\approx 1\%$  К и низкий уровень избыточного шума. Перспективными в этом плане являются аморфные или поликристаллические пленки кремния, изготовленные разными методами [3,4,6]. Представленная работа посвящена исследованию болометрических и шумовых свойств аморфных гидрированных пленок кремния (*aSi:H*), полученных методом плазмохимического газофазного осаждения.

Применение технологии плазмохимического газофазного осаждения для получения аморфных гидрированных кремниевых пленок, используемых в качестве термочувствительных слоев микроболометров, привлекательно в силу нескольких причин. Можно получать пленки с удельным сопротивлением в диапазоне  $10^2$ – $10^{11}$  Ом · см и энергией активации в диапазоне 0.1–0.8 эВ, которой соответствуют значения

температурного коэффициента сопротивления при комнатной температуре от 1 до 10% К. Заметим, однако, что максимальной энергией активации обладают наиболее высокоомные пленки. Плазмохимическое газофазное осаждение пленок производится при низких температурах подложек (200–300° С), причем на подложки из различных материалов. Метод плазмохимического газофазного осаждения вполне совместим с современной технологией кремниевых интегральных микросхем.

В случае использования высокоомных термочувствительных пленок с удельным сопротивлением 10–100 кОм·см наиболее оптимальным вариантом построения микроболометров является сэндвичный вариант [3,6]. В структуре сэндвичного типа термочувствительный слой заключен между металлическими пленками электродов. Именно этот вариант был выбран для изготовления тестовых структур на основе пленок  $aSi:H$ . Образцы получали с использованием съемных медно-никелевых масок в топологии, соответствующей чувствительным элементам микроболометров. Подложками служили пластинки ситалла толщиной 0,5 мкм. Площадь сэндвичей была  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. В качестве электродов использовали пленки хрома, полученные методом магнетронного распыления в аргоновой плазме на постоянном токе.

Изготовление термочувствительных сэндвич-структур  $Cr-aSi:H-Cr$  с необходимыми характеристиками сводилось к оптимизации напыления слоев  $Cr$  с заданной проводимостью, к оптимизации технологических параметров осаждения пленок  $aSi:H$  с максимальной энергией активации при удельном сопротивлении 5–30 кОм·см и достижению наиболее "омических" контактов металлических электродов с кремниевой пленкой. Поверхностное сопротивление электродов (380 и 20 Ом) и толщина кремниевой пленки (0,7 мкм) были выбраны с учетом того, что сэндвич-структуры должны были обладать свойствами оптических резонаторов, "настроенных" на длину волны  $\approx 10$  мкм, с целью обеспечения высокого поглощения излучения в интервале спектра 8–12 мкм [3]. Требуемое полное сопротивление структур (5–20 кОм) достигали слабым легированием пленок  $aSi:H$  фосфором, посредством плазмохимического газофазного осаждения силана с добавлением фосфина.

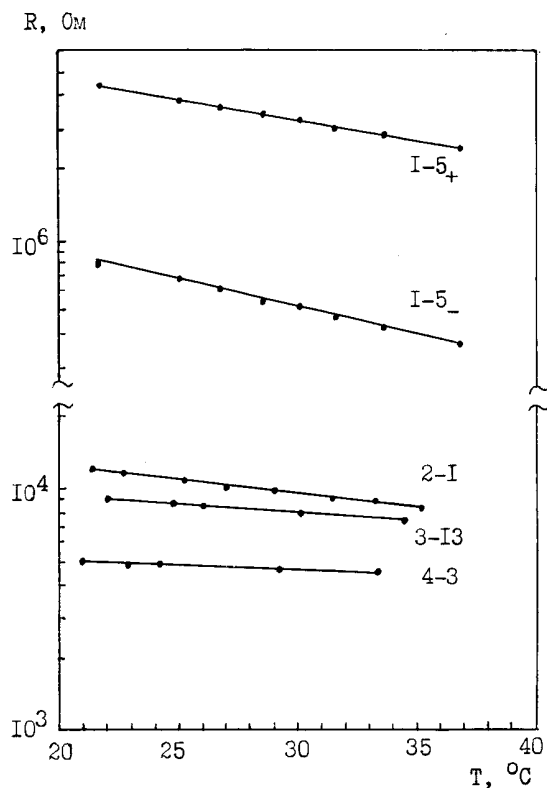
Для оценки болометрических свойств изготовленных структур проводили измерения вольт-амперных характеристик, температурных зависимостей сопротивления и спектров шума. Температурные зависимости сопротивления измеряли на постоянном токе 0,1–4 мкА в диапазоне температур 18–40°С. Шум исследовали в диапазоне частот 10–1000 Гц

при пропускании токов от 0.7 до 12 мкА и без тока. Измерительная схема включала предварительный усилитель, собственный шум которого был  $9 \text{ нВ}/\text{Гц}^{1/2}$  на частоте 12 Гц и монотонно снижался до  $1.5 \text{ нВ}/\text{Гц}^{1/2}$  на 1 кГц, и анализатор спектра СК4-56. Калибровку измерительного тракта проводили по тепловому шуму резистора известного номинала.

С целью оценки омичности контактов вначале были изготовлены структуры с повышенным сопротивлением, т.е. с пониженным уровнем легирования термочувствительного слоя. В этом случае сопротивление металлических электродов, составлявшее 1–2 кОм, не оказывало влияния на вольт-амперные характеристики. Кроме того, достаточно низкая проводимость термочувствительного слоя позволила убедиться, что работает именно перекрытие электродов площадью  $10^{-4} \text{ см}^2$  (т.е. сами сэндвич-структуры), а поверхностная проводимость легированных слоев в данной конфигурации масок существенно ниже проводимости структур. Такие структуры обладали нелинейными вольт-амперными характеристиками, причем при приложении напряжений в несколько вольт разной полярности пропускаемые токи отличались более чем на два порядка. Зависимость сопротивления от полярности приложенного напряжения, характер вольт-амперных характеристик и температурных зависимостей сопротивления этих образцов свидетельствовали о наличии в контактах барьеров Шоттки и, возможно, тонких оксидных пленок [4,7].

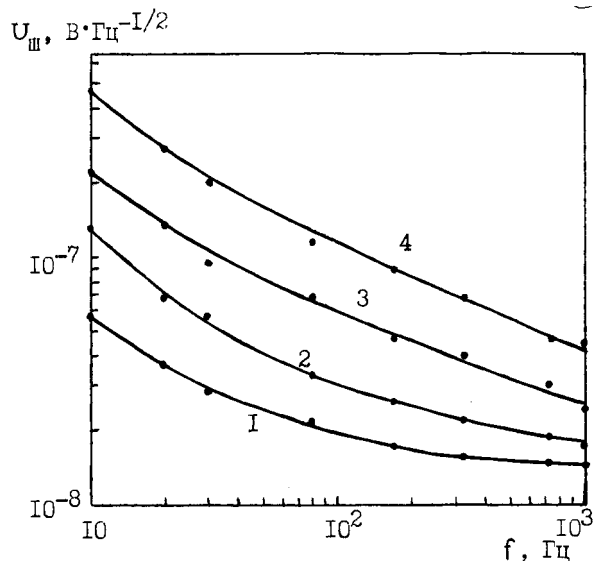
Для улучшения качества контактов пленки  $a\text{Si:H}$  с электродами при последующих напылениях в сэндвичи вводили слои с повышенной концентрацией носителей ( $n^+$ -слои) разной толщины и степени легирования. Варьировали также степень легирования термочувствительной пленки с целью оптимизации величин сопротивления и энергии активации. Введение  $n^+$ -слоя с уровнем легирования 0.1% и толщиной 100 Å в высокоомную структуру с уровнем легирования термочувствительного слоя 0.008% не дало желаемого результата. Пример температурной зависимости сопротивления высокоомной структуры при разных направлениях измерительного тока представлен на рис. 1 (образец 1–5).

Наибольший эффект улучшения контактов получен на образцах с  $n^+$ -слоями толщиной 400 Å и степенью легирования 2% (образец 3–13). Об этом свидетельствовали как совпадения величин сопротивления при разных полярностях приложенного напряжения, так и характер спектров шума (рис. 2). В измеренное напряжение шума образца 3–13 основной вклад вносили токовый шум и тепловой (джонсоновский) шум



**Рис. 1.** Температурная зависимость сопротивления сэндвич-структур с приконтактными  $n^+$ -слоями. Уровень легирования термочувствительного слоя образцов, толщина и уровень легирования  $n^+$ -слоев составляет соответственно:  $I-5$  — 0.008%, 100 Å, 0.1% (знаками  $-$ ,  $+$  отмечены зависимости при разных направлениях тока);  $2-1$  — 0.1%, 200 Å, 2%;  $3-13$  — 0.1%, 400 Å, 2%;  $4-3$  — 0.3%, 200 Å, 2%.

сопротивления. Как показал расчет в модели болометра на твердой подложке, напряжение фоновый шума, связанного с теплообменом сэндвич-структуры с ситалловой подложкой, при указанных на рис. 2 токах на два-три порядка меньше напряжения шума Джонсона и на результирующий шум влияния не оказывает.



**Рис. 2.** Частотная зависимость напряжения результирующего шума образца 3-13 при разных токах: 1 — 1.1 мкА, 2 — 2.2 мкА, 3 — 4.5 мкА, 4 — 11.4 мкА.

При токе 1.1 мкА на частоте 30 Гц избыточный шум образца 3-13 превышает джонсоновский шум в 1.7 раза. На частоте 1 кГц при том же токе измеренный шум полностью обусловлен джонсоновским шумом. Частотная зависимость спектральной плотности мощности избыточного шума имеет вид  $U_{ш}^2 \sim 1/f^{1.0}$ , а токовая зависимость —  $U_{ш}^2 \sim I^2$ .

Максимальным температурным коэффициентом сопротивления (2.1%/К) при сопротивлении 10–17 кОм среди структур с хорошими контактами обладают образцы со степенью легирования термочувствительного слоя 0.1% (образец 2-1, рис. 1). Повышение степени легирования до 0.3% существенно снизило температурный коэффициент сопротивления (образец 4-3). Отношение максимального к минимальному сопротивлению образцов одной серии (16 сэндвичей на подложке  $30 \times 48 \text{ мм}^2$ ) в худшем случае составляло 1.8, а разброс по температурному коэффициенту сопротивления не превышал 30%. Последнее объясняется технологическим разбросом электрофизических

5\* Письма в ЖТФ, 1997, том 23, № 12

свойств пленки  $a\text{Si:H}$ , а причиной первого является, кроме того, разброс в размерах съемных масок и качестве их прилегания к подложке.

Таким образом, получены и исследованы сэндвич-структуры площадью  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>, отвечающие требованиям чувствительных элементов неохлаждаемых микроболометров. Методика изготовления структур совместима с современной кремниевой планарной технологией и обеспечивает небольшой разброс параметров. При оптимальном сопротивлении изготовленные структуры имеют температурный коэффициент сопротивления на уровне микроболометров реализованных неохлаждаемых инфракрасных матриц. Показана возможность эффективного снижения контактного шума структур на рабочих частотах неохлаждаемых матриц и достижения при токах  $\sim 1$  мкА напряжения результирующего шума на уровне джонсоновского шума.

Работа в части исследования шумов поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований по проекту N 960218563.

## Список литературы

- [1] *Flannery R.E., Miller J.E.*, // Proc. SPIE. 1992. V. 1689. P. 379–396.
- [2] *Wood R.A.* // Proc. SPIE. 1993. V. 2020. P. 322–329.
- [3] *Liddiard K.C.* // Proc. SPIE. 1993. V. 1969. P. 206–216.
- [4] *Unewisse M.H., Graig B.I., Watson R.J., Liddiard K.C.* // Proc. SPIE. 1995. V. 2554. P. 43–45.
- [5] *Bulter N., Blackwell R., Murphy R. et al.* // Proc. SPIE. 1995. V. 2552. P. 583–591.
- [6] *Liddiard K.C., Unewisse M.H., Reinhold O.* // Proc. SPIE. 1994. V. 2225. P. 62–71.
- [7] *Андреев А.А., Голикова О.А., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю., Мездрогина М.М., Рубин В.С., Феоктистов Н.А.* // ФТП. 1984. Т. 18. В. 2. С. 373–376.