

06;11;12

## Аморфные пленки кремния и германия для неохлаждаемых микроболометров

© Т.А. Енукова, Н.Л. Иванова, Ю.В. Куликов,  
В.Г. Маляров, И.А. Хребтов

ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова", С.-Петербург

Поступило в Редакцию 17 февраля 1997 г.

Представлены результаты экспериментального анализа возможности применения в неохлаждаемых микроболометрах аморфных пленок кремния и германия, изготовленных методом магнетронного распыления. Получены пленки  $a$ -Si и  $a$ -Ge, имеющие энергию активации и удельное сопротивление, равные 0.135 и 0.2 эВ, и 50 и 0.4 кОм · см соответственно.

Среди осуществляемых программ по инфракрасной технике видное место в последние годы отводится разработкам неохлаждаемых многоэлементных приемников и, в первую очередь, микроболометрических матриц [1–4]. Такие матрицы по чувствительности в области спектра 8–14 мкм приближаются к криогенным фотонным многоэлементным линейкам и выгодно отличаются от них более низкой стоимостью и лучшими эксплуатационными характеристиками, что обуславливает широкие перспективы их использования.

Одной из основных проблем создания высокочувствительных неохлаждаемых микроболометров для инфракрасной матрицы является получение пленочного термочувствительного элемента размерами  $40 \times 40$ – $100 \times 100$  мкм, обладающего сопротивлением 5–30 кОм, низким уровнем избыточного шума и высоким температурным коэффициентом сопротивления при комнатной температуре (1–3%/К). Кроме того, технология изготовления такого элемента должна сочетаться с современной технологией кремниевых микросхем. С учетом этих требований перспективны аморфные пленки кремния и германия [2,4].

Наибольшее распространение получили два типа структуры чувствительного элемента микроболометра — планарная (щелевая) и сэндвичная [1,2]. Первая структура предполагает расположение термочувствительной пленки в планарном зазоре между двумя участками металлической пленки, выполняющими функции электродов, а вто-

рая — формирование термочувствительного слоя между верхним и нижним пленочными электродами. Для изготовления микроболометра планарного типа термочувствительная пленка должна иметь удельное сопротивление ( $\rho$ ) порядка 1–10 Ом · см при комнатной температуре. Для микроболометров сэндвичной структуры требуются пленки с  $\rho = 5–50$  кОм · см. Объектом исследований данной работы были пленки аморфных кремния и германия ( $a$ -Si,  $a$ -Ge), получаемые методом магнетронного распыления.

Пленки  $a$ -Si толщиной  $\sim 1$  мкм получали распылением мишени из кремния марки КЭФ с удельным сопротивлением 60 Ом · см с помощью планарного магнетрона в атмосфере аргона. Магнетрон работал на постоянном токе разряда. Перед каждым напылением вакуумная камера откачивалась до давления  $7 \cdot 10^{-7}$  Тор, рабочее давление Ar поддерживалось с помощью сорбционного насоса, который откачивался перед напылением вместе с камерой. Из-за отсутствия в системе охлаждения температура подложки в процессе напыления ( $\sim 1$  час) могла повышаться до 80–200 °С в зависимости от мощности разряда. Пленки наносили на ситалловые подложки с напыленными планарными платиновыми электродами и одновременно на кремниевые пластины с изолирующим SiO<sub>2</sub> слоем. Во втором варианте, с использованием съемных медно-никелевых масок, получали 8 сэндвич-структур площадью  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> за одно напыление. Электродами в этих образцах служили пленки титана.

Оценку свойств образцов проводили путем измерения температурной зависимости сопротивления и спектров шума. Температурную зависимость сопротивления измеряли на постоянном токе 1–5 мкА. Спектры шума исследовали в диапазоне частот 10 Гц–1 кГц с использованием малошумящего предварительного усилителя и анализатора спектра СК4-56.

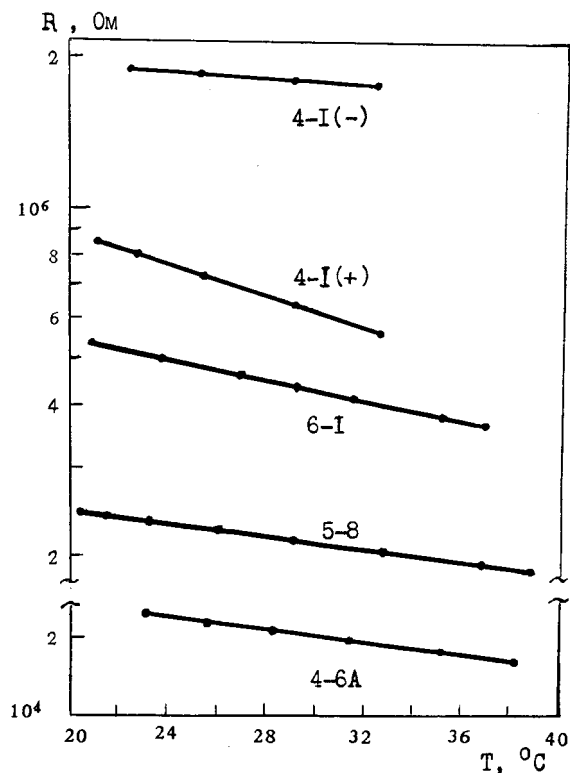
Свойства термочувствительных пленок зависели от давления Ar и мощности разряда. Магнетронный источник работал устойчиво в интервале давлений  $1 \cdot 10^{-2}$ – $3 \cdot 10^{-3}$  Тор. Удельное сопротивление осаждаемых пленок при этом менялось от  $10^9$  до  $10^6$  Ом · см. Однако пленки с  $\rho = 10^6$  Ом · см, полученные при низких давлениях, могли отслаиваться на воздухе из-за сильных сжимающих внутренних напряжений. Оптимальным было давление  $1 \cdot 10^{-2}$  Тор. Получить пленки с  $\rho = 10^6$  Ом · см удалось увеличением разрядного тока от 50 до 100–120 мА. Дальнейшее увеличение разрядного тока не приводило к снижению величины удельного сопротивления.

Сопротивление и энергия активации проводимости ( $E_t$ ) пленок  $a$ -Si зависят также от степени легирования материала мишени [5]. С целью дальнейшего снижения величины  $\rho$  была использована мишень из кремния марки КЭС с удельным сопротивлением  $0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . С этой мишенью в планарной конфигурации электродов получили пленки с  $\rho = 90\text{--}50 \text{ кОм} \cdot \text{см}$  и  $E_t = 0.135 \text{ эВ}$  (температурный коэффициент сопротивления  $1.8\%/K$  при  $25^\circ\text{C}$ ), что при условии отсутствия анизотропии свойств пленок было бы удовлетворительным для микроболометров сэндвичной структуры. Однако значение  $\rho$  сэндвич-структур на порядок и более превосходило значения  $\rho$  планарных структур, полученных за одно напыление. Сопротивления сэндвичных образцов одной серии при измерительном токе  $\sim 1 \text{ мкА}$  различались в  $10\text{--}20$  раз и зависели как от величины тока, так и от его направления.

На рис. 1 приведен пример температурных зависимостей сопротивления одного из сэндвичей (образец 4-1) при разных направлениях измерительного тока  $\sim 2 \text{ мкА}$ . При одном направлении тока найдена  $E_t = 0.295 \text{ эВ}$ , а при другом —  $0.051 \text{ эВ}$  (температурный коэффициент сопротивления при  $25^\circ\text{C}$   $3.8$  и  $0.7\%/K$  соответственно). Мы полагаем, что такой эффект мог возникнуть из-за влияния барьерных несимметричных контактов типа Ti-TiO-Si на одной стороне и Si-SiO-Ti на другой стороне сэндвич-структуры. Это предположение подтвердилось измерением вольт-амперных характеристик структур.

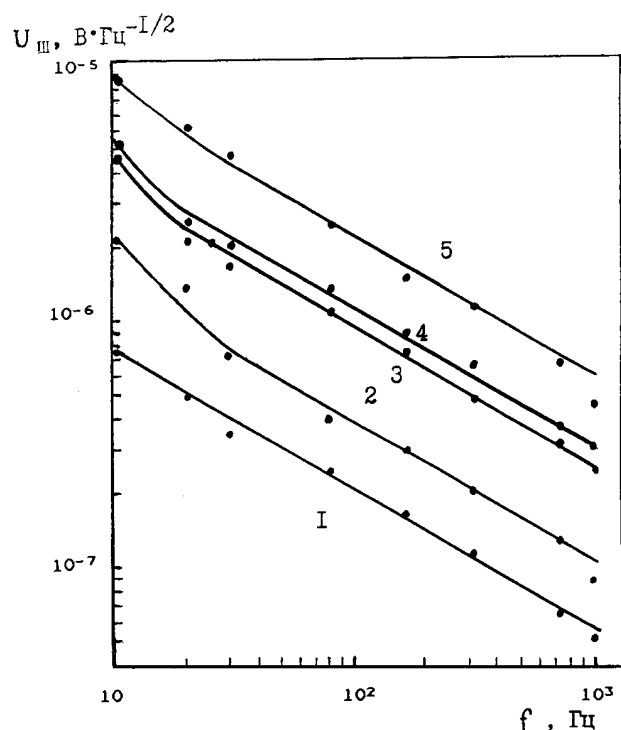
В сэндвичном образце 4-6А (рис. 1) площадью  $0.9 \text{ мм}^2$  вместо верхнего напыленного Ti электрода мы использовали электрод из сплава Вуда. Энергия активации этого образца ( $0.13 \text{ эВ}$ ) была близка к  $E_t$  планарного образца, а сопротивление при комнатной температуре превышало значение, подсчитанное по  $\rho$  планарного образца на  $20 \text{ кОм}$ , хотя и оставалось практически тем же при смене направления измерительного тока. Это также подтверждало предположение о несимметричных барьерных эффектах. Не случайно, что зарубежные разработчики, наблюдавшие подобные эффекты, пришли к однокамерному напылению сэндвич-структур без развакуумирования [2]. Спектры шума образца 4-6А при разных токах представлены на рис. 2. Шум имеет явно токовую природу и частотную зависимость  $1/f^{1.1}$ . При указанных токах напряжение измеренного шума на два порядка превосходило напряжение теплового шума сопротивления и обусловлено, по нашему мнению, неомичностью контактов.

С целью уменьшения влияния окислов на границе металл-полупроводник перед напылением пленки  $a$ -Si подложку с Ti электродом



**Рис. 1.** Температурная зависимость сопротивления пленочных образцов  $\alpha$ -Si и  $\alpha$ -Ge (6-1). Образцы 4-1, 5-8 и 4-6А имеют сэндвич-конфигурацию площадью 0.01, 0.01 и 0.9 мм<sup>2</sup> соответственно; образец 6-1 — планарную конфигурацию и площадь рабочего участка термочувствительной пленки 8 мм<sup>2</sup>. Знаки (+) и (-) указывают на разные направления измерительного тока.

подвергли легкому травлению в плазме тлеющего разряда в Ar. Перед нанесением верхнего Ti электрода в другой установке также провели очистку поверхности пленки  $\alpha$ -Si в Ar (образец 5-8, рис. 1). Сопротивления образцов этой серии отличались не более чем в 2.5 раза и имели  $E_t = 0.12$  эВ, т.е. практически такую же, как у образца 4-6 А. Изменение сопротивления при смене направления тока составляло 5-9%.



**Рис. 2.** Спектры напряжения шума образца 4-6А при разных токах: 1 — 1.1 мкА; 2 — 2.2 мкА; 3 — 4.4 мкА; 4 — 6.7 мкА; 5 — 11.1 мкА.

Для получения пленок аморфного кремния с более низким удельным сопротивлением, вплоть до  $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , в условиях нашего эксперимента требуется тщательный контроль состава остаточной атмосферы в вакуумной камере и чистоты используемого аргона. Наличие в камере водорода, кислорода, паров воды приводит к пассивации этими газами оборванных связей в аморфном кремнии, в результате чего осаждается пленка аморфного гидрированного кремния, материала с другими электрическими и оптическими свойствами [6].

Использование в качестве материала распыляемой мишени германия позволяет достичь тех же значений  $E_t$ , что и с кремнием, но при более низких удельном сопротивлении и уровне шума [4]. Это подтвердилось

результатами распыления мишени из монокристаллического Ge марки ГМО с удельным сопротивлением  $50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в тех же условиях, в каких были получены пленки  $a\text{-Si}$ . Осаждение провели на подложку из ситалла с планарной конфигурацией электродов. При  $\rho = 4 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  полученный образец (6–1) имел  $E_t = 0.2 \text{ эВ}$ . Удельное сопротивление пленки  $a\text{-Ge}$  отличалось от сопротивления используемой мишени всего в 8 раз (в случае кремния — 4 порядка). Это свидетельствует о том, что Ge менее чувствителен к паразитным остаточным газам, чем кремний. Более того, для данного материала пассивация оборванных связей водородом является желательной для получения оптимального удельного сопротивления. Например, в статье [7] показано, что пленки аморфного гидрированного германия, полученные при добавлении к Ar 10%  $\text{H}_2$ , имеют  $\rho$  до  $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и  $E_t = 0.42 \text{ эВ}$ . Перспективным является также получение пленок  $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  путем совместного распыления кремния и германия. Меняя соотношение Si и Ge в распыляемой мишени, можно получить пленки с широким выбором комбинаций  $\rho$  и  $E_t$ .

В результате проведенной работы методом магнетронного распыления получены пленки  $a\text{-Si}$  и  $a\text{-Ge}$ , имеющие температурный коэффициент сопротивления от 1.6 до 2.6%/K при  $25^\circ$ , что соответствует температурному коэффициенту сопротивления микроболометров зарубежных неохлаждаемых матриц [1–4]. Достижение требуемого удельного сопротивления и энергии активации пленок  $a\text{-Ge}$  проще, чем пленок  $a\text{-Si}$ . Технология получения омических малошумящих контактов этих термочувствительных пленок с электродами требует дальнейшей проработки.

## Список литературы

- [1] Wood R.A., Foss N.A. // Lazer Focus World. 1993. V. 29. N 6. P. 101–106.
- [2] Unewisse M.H., Graig B.I., Watson R.J., Liddiard K.C. // Proc. SPIE. 1995. V. 2554. P. 43–45.
- [3] Marshall C., Butler N., Blackwell R., Murphy R., Breen T. Proc. SPIE. 1996. V. 2746. P. 23–31.
- [4] Unewisse M.H., Liddiard K.C., et al. // Proc. SPIE. 1995. V. 2552. P. 77–87.
- [5] Pawlewicz W.T. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. N 11. P. 5595–5601.
- [6] Иванова Н.Л., Никитин В.В., Онохов А.П. // Оптический журнал. 1993. N 7. С. 45–49.
- [7] Nquyen Van Dong, Tran Quoc Hai // Phys. Stat. Sol. (b). 1978. V. 88. N 2. P. 355–561.