

ОСОБЕННОСТИ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК Au—Ge ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТОВ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ

Т. А. Брянцева, В. В. Лопатин, В. Е. Любченко

Исследованы особенности коалесцентного распада тонких пленок (0.05—0.1 мкм) Au—Ge (Ge до 5 вес.%) в процессе формирования невыпрямляющих контактов малых размеров к полупроводникам типа A^3B^5 . Образцы изготавливались следующим образом. Поверхность полупроводника (GaAs, InP) покрывалась слоем окиси кремния, в котором затем с помощью фотолитографии вскрывались контактные окна, обнажающие поверхность полупроводника. Далее на поверхность полученной структуры методом термического испарения в вакууме осаждались пленки металла. Показано, что в интервале температур 570—690 К происходит частичный перенос материала пленки с поверхности SiO_2 на вскрытые участки полупроводника и коалесценция металлической пленки на SiO_2 вплоть до полного распада на изолированные островки, что объясняется различием коэффициентов термического расширения для исследуемых материалов: золота, окиси кремния и полупроводника. Показана возможность получения изолированных контактов заданной формы и малых размеров, в частности, омических контактов к n -InP площадью ~ 50 мкм² и с малым переходным сопротивлением.

Известно, что в сплошной металлической пленке, полностью покрывающей подложку, при термическом отжиге может протекать процесс коалесценции вплоть до полного распада на изолированные островки [1-3]. В [2] было показано, что поликристаллическая пленка, нанесенная на поверхность кристалла, неустойчива и ее распад на изолированные островки термодинамически оправдан. Коалесценция пленки в случае изменения температуры системы может вызываться напряжениями, возникающими из-за различия коэффициентов термического расширения пленки и подложки. При этом наблюдается так называемый «бугорковый» механизм распада [2, 4]. В [5] показано, что кинетика роста бугорков и соответственно кинетика распада пленки на изолированные островки определяется диффузионным переносом вещества к бугорку из окружающей пленки.

В настоящей работе исследованы особенности коалесцентного распада тонких металлических пленок Au—Ge в процессе формирования контактов малых размеров, необходимых для изготовления диодов Ганна и других приборов из арсенида галлия и фосфида индия.

Образцы в виде монокристаллического арсенида галлия или фосфида индия предварительно покрывались пленкой окиси кремния толщиной 0.2—0.3 мкм, в которой затем с помощью фотолитографии были вскрыты окна в виде дисков диаметром 8—20 мкм с расстояниями между центрами окон 15—40 мкм. Тонкие пленки золота толщиной 0.05—0.1 мкм с небольшими (до 5 вес.%) добавками германия осаждались методом термического испарения в вакууме $\sim 10^{-4}$ Па, а затем подвергались термическому отжигу в вакууме в интервале температур 570—820 К.

Оказалось, что в процессе отжига на поверхности SiO_2 происходит коалесценция металлической пленки, а также частичный перенос материала пленки в окна, где вскрыта поверхность полупроводника. При этом вдали от окон на поверхности SiO_2 образуются изолированные островки

металла. Исследования топографии поверхности структур при различных температурно-временных режимах отжига позволили уточнить характер протекания этого процесса. Перенос материала пленки в окна заметен уже при температуре $T \sim 570$ К после отжига в течение одного часа. Пленка металла вокруг окон утоньшается, хотя и остается еще сплошной. На микрофотографии, приведенной на рис. 1, б, вокруг окон видны характерные разводы, имеющие буроватый (цвета окисла) оттенок. В результате отжига при $T \sim 620$ К в течение 1 часа утоньшенные вокруг окон участки пленки рвутся, обнажая поверхность SiO_2 , и процесс массопереноса заканчивается перемещением значительной части металла в окна (рис. 1, в). В то же время вдали от окон пленка на поверхности SiO_2 испещрена бугорками и порами, что свидетельствует о протекании коалесцентного распада по «бугорковому» механизму. При $T \sim 670$ К, 1 мин вид поверхности образцов аналогичен картине, полученной в ре-

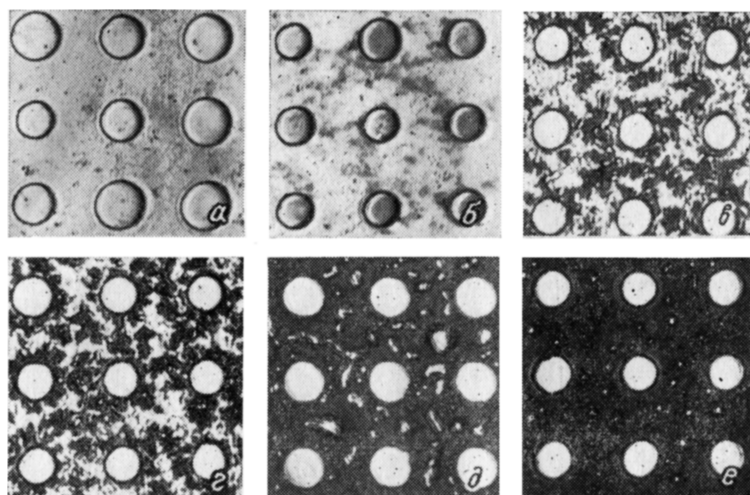


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов из InP с пленкой золота толщиной ~ 0.05 мкм после отжига.

а — исходный образец, б — $T \sim 570$ К, 1 ч; в — $T \sim 620$ К, 1 ч; г — $T \sim 670$ К, 1 мин; д — $T \sim 690$ К, 1 мин; е — $T \sim 770$ К, 1 мин; $\times 800$, косое освещение.

зультате отжига при $T \sim 620$ К в течение 1 ч (рис. 1, в). С увеличением температуры отжига на поверхности SiO_2 вдали от окон формируются изолированные островки вытянутой неравновесной формы. При $T \sim 770$ К (1 мин) происходит видоизменение островков металла на SiO_2 к более равновесной форме (рис. 1, е). Отжиг при $T \sim 820$ К (1 мин) не приводит к заметным изменениям островков на SiO_2 . Важным методом с точки зрения создания невыпрямляющих контактов к GaAs и InP является то, что благодаря массопереносу толщина пленки золота в окнах достигает ~ 0.3 мкм (при толщине напыленного слоя ~ 0.05 мкм). Отметим, что во всех случаях пленка металла в окнах имеет однородную поверхность.

В более тонких пленках (~ 0.02 мкм) при тех же условиях отжига происходит обычный процесс коалесценции, вплоть до полного распада на изолированные островки без заполнения окон. То же самое наблюдается и с увеличением толщины окисного слоя (~ 0.4 мкм). При этом пленка металла в начале отжига рвется по контуру окна. В последнем случае увеличение толщины пленки металла до ~ 0.1 мкм снова позволяет наблюдать массоперенос в окна.

Аналогичные процессы наблюдаются при произвольной конфигурации окон. В частности, в настоящей работе проводились исследования описанных выше процессов на структурах с окнами в виде колец диаметром

500 мкм и шириной 5—20 мкм (рис. 2). При этом процесс переноса материала в окна захватывает довольно значительную область пленки металла на SiO_2 вокруг окна — кольцо шириной 7—9 мкм (рис. 2, б). Поэтому для контролируемого заполнения окон при формировании невыпрямляющих контактов важно правильно подобрать соотношение между толщиной пленки металла, плотностью расположения окон и площадью окна. Так, при толщине пленки металла ~ 0.05 мкм на структурах с формой контактных окон в виде дисков из-за малого расстояния между окнами практически весь материал пленки переносится в окна. На структурах с контактными окнами в форме колец расстояние между окнами было выбрано большим (~ 1 мм) и отчетливо выделяется область SiO_2 в виде кольца шириной 7—9 мкм, свободная от пленки металла.

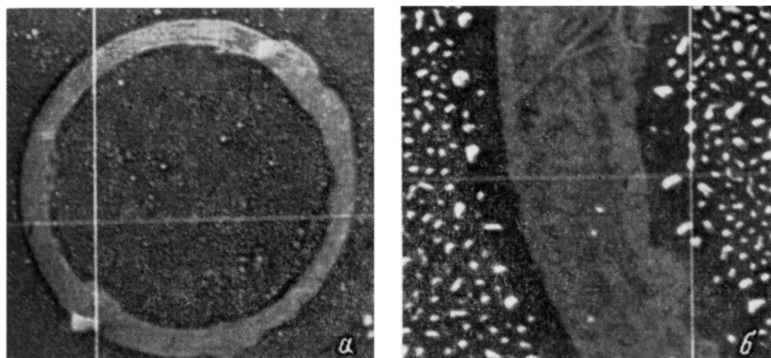


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов с окнами GaAs в виде колец, толщина пленки золота ~ 0.05 мкм, отжиг при $T \sim 770$ К, 1 мин.

а — общий вид одного кольца, $\times 80$; б — часть этого кольца, $\times 320$.

Для объяснения наблюдаемых явлений заметим, что в структурах такого типа наблюдаются большие внутренние напряжения, связанные как с дефектами, возникающими в процессе роста пленок, так и термического происхождения из-за различия коэффициентов термического расширения пленки и подложки. При отжиге в пленке, нанесенной на подложку с низким коэффициентом термического расширения (в данном случае SiO_2), будут возникать сжимающие напряжения, приводящие к диффузионному переносу материала пленки в окно, где те же напряжения, если и возникнут, то будут гораздо меньше. Это согласуется с известными данными о величине коэффициента линейного расширения для исследуемых веществ: золота, окиси кремния, арсенида галлия и фосфида индия. Кроме того, при данной геометрии контактных окон давление, возникающее за счет сил поверхностного натяжения со стороны поверхности с отрицательной кривизной, также способствует движению атомов металла в область окон. Напряжения, возникающие в процессе термического отжига пленки на подложке, определяются выражением [4]

$$\sigma_T = (\alpha_{пл} - \alpha_{подл}) \Delta TE / (1 - \nu), \quad (1)$$

где E — модуль Юнга пленки, ν — коэффициент Пуассона, $\alpha_{пл}$ и $\alpha_{подл}$ — коэффициенты термического расширения пленки и подложки соответственно. Исходя из этого выражения можно оценить разность сжимающих напряжений в пленке металла на SiO_2 и в области окна

$$\Delta \sigma = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta TE / (1 - \nu), \quad (2)$$

где α_1 , α_2 — соответственно коэффициенты термического расширения полупроводника (GaAs или InP) и окиси кремния. При $\Delta T \approx 300$ К, $E = 80$ ГПа, $\nu = 0.42$ (для золота), $\alpha_2 = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [6], $\alpha_1 = 6.86 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (для GaAs) [7], $\alpha_1 = 4.75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (для InP) [7]. Исходя из этих данных

для GaAs оценка даст $\Delta \sigma \approx 0.3$ ГПа, для InP, $\Delta \sigma = 0.2$ ГПа. Оценку избыточного давления, обусловленного кривизной поверхности границы окон, можно получить из формулы Лапласа

$$\Delta \sigma = \beta/R, \quad (3)$$

где β — величина поверхностного натяжения пленки (для золота $\beta \approx \approx 140$ мН/м), R — радиус окна. Для окон диаметром 10 мкм получим величину примерно на три порядка меньше той, которая обусловлена разницей коэффициентов термического расширения. Следовательно, в нашем случае основной причиной массопереноса является релаксация термических сжимающих напряжений в пленке металла.

Описанные процессы приведут, с одной стороны, к заполнению окон, утоньшению пленки металла вокруг них и к ее разрыву, а с другой стороны, — к образованию бугорков металла на SiO_2 , утоньшению пленки вокруг них с последующим распадом ее на изолированные островки, причем коалесценция металлической пленки на SiO_2 будет конкурирующим механизмом для процесса массопереноса в окна полупроводников. Вблизи окон перенос материала пленки в окна преобладает над зарождением и ростом бугорков. Это можно, по-видимому, объяснить малым по сравнению с окнами размером бугорков, поскольку диффузионный поток прямо пропорционален площади диффузионного фронта, кроме того, рост самих бугорков, имеющих положительную кривизну поверхности, будет стимулировать диффузионный перенос массы от бугорков к впадинам, т. е. к выравниванию поверхности и замедлению роста бугорков.

Использование описанных выше процессов массопереноса части пленки металла в окна полупроводника и коалесценции пленки металла до образования изолированных островков на SiO_2 вдали от окон оказалось эффективным при создании невыпрямляющих контактов малых размеров. Так, при отжиге пленки золота толщиной ~ 0.05 мкм с небольшими (до 5 % вес.) добавками германия при температуре $T \sim 770$ К в течение 1 мин формируются электрически изолированные омические контакты диаметром ~ 10 мкм к $n = \text{InP}$ (рис. 1, е) с низким переходным сопротивлением $\rho_k \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² при концентрации электронов в n -слое $n \sim 10^{16}$ см⁻³.

Л и т е р а т у р а

- [1] Трусов Л. И., Холмянский В. А. Островковые металлические пленки. М.: Металлургия, 1973. 321 с.
- [2] Гезузин Я. Е., Кагановский Ю. С., Кибец В. И., Макаровский Н. А. ФММ, 1975, т. 39, № 6, с. 1205—1210.
- [3] Kane W. M., Spratt J. P., Hershinger L. W. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, N 5, p. 2085—2089.
- [4] Presland A. E. B., Price G. L., Trimm D. L. Surf. Sci., 1972, vol. 29, N 2, p. 424—434.
- [5] Гезузин Я. Е., Макаровский Н. А., Богданов В. В. ФММ, 1978, т. 45, № 2, с. 347—353.
- [6] Броддай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985. 494 с.
- [7] Стрельченко С. С., Лебедев В. В. Соединения A³B⁵. Справочник. М.: Металлургия, 1984. 144 с.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
12 июня 1987 г.