

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТОВ МАЛОЙ ПЛОЩАДИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ К ГЕРМАНИЮ ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

© С. Ашмонтас, А. Сужделлис

Институт физики полупроводников,

2600 Вильнюс, Литва

(Получена 17 апреля 1995 г. Принята к печати 31 мая 1995 г.)

Изготовлены контакты In, Al, Au к *p*-Ge путем термического напыления (In, Al) или электрохимического осаждения (Au) металла и последующего отжига при различных температурах в атмосфере водорода. Исследованы вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики контактов In-*p*-Ge, Al-*p*-Ge, Au-*p*-Ge с использованием импульсов тока или СВЧ излучения в интервале температур решетки 80 ÷ 300 К. В случае контактов In-*p*-Ge влияние температуры отжига на характеристики пренебрежимо мало, однако для контактов с Al и Au оно становится существенным. В диодах Au-*p*-Ge зависимость сигнала от действующей СВЧ мощности немонотонна. Вольт-амперная и вольт-ваттная характеристики диодов зависят от сопротивления контакта. Показано, что этот эффект может быть уменьшен за счет использования контакта в виде узкой полосы.

1. Введение

В измерителях СВЧ мощности наиболее часто используется точечный омический контакт к *p*-Ge [1]. Эти контакты создаются нанесением золота на поверхность полупроводника и последующей формовкой контакта импульсами постоянного электрического тока. Процесс электрической формовки, используемый для уменьшения электрического сопротивления диода и получения *l-h*-перехода, не является совершенным с технологической точки зрения, параметры получаемых контактов металл-полупроводник зависят от целого ряда факторов и отсюда — большой их разброс от образца к образцу. Результат уменьшения сопротивления контакта диода при сохранении высокого значения его вольт-ваттной чувствительности может быть достигнут путем изменения формы контакта малых размеров — изготовлением контактов в виде узкой полосы [2]. Пара золото-германий также не является оптимальной для создания *p-p*⁺-перехода, так как золото является амфотерной мало растворяющейся примесью в германии (предельная растворимость составляет $\sim 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [3]), дающей в запрещенной зоне три глубоких акцепторных и один донорный энергетические уровни

[4]. Поэтому представляет значительный практический интерес исследовать возможность использования металлов, которые дают мелкие акцепторные уровни в германии и хорошо растворяются в нем, для создания качественных $l-h$ -переходов, используемых в измерителях СВЧ мощности. Таковыми, например, являются индий, акцепторный уровень которого удален от потолка валентной зоны германия на расстояние 0.011 эВ , и алюминий — 0.01 эВ . Предельная растворимость индия в Ge на два порядка превышает растворимость золота в этом материале, хотя содержание In в эвтектическом сплаве составляет всего лишь $\sim 0.05 \text{ ат\%}$. Растворимость Al в Ge составляет $\sim 3.7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а содержание алюминия в эвтектическом сплаве — 0.28 ат\% [3]. В настоящей работе приводятся результаты исследований электрических свойств контактов малых геометрических размеров In- p -Ge, Al- p -Ge и Au- p -Ge в зависимости от температуры их отжига.

2. Образцы и методика измерений

Слитки монокристаллического германия дырочной проводимости с удельным сопротивлением, равным 15 и 30 Ом·см, разрезались на пластины, плоскости которых были параллельны кристаллографической плоскости (100). Обе поверхности пластин шлифовались, а лицевая их сторона подвергалась еще механической и химико-динамической полировке для получения зеркальной поверхности. После травления поверхности пластин в перекиси водорода напылялся In в вакууме при температуре подложки 300°C , а Al — при 350°C . Методом фотолитографии формировались металлические контакты малой площади. Контакты Au- p -Ge создавались путем электрохимического осаждения золота из раствора дидианоурата калия через маску фоторезиста на лицевую сторону и на шлифованную сторону пластины. Пластины с металлическими контактами малых размеров подвергались термическому отжигу в атмосфере водорода в течение 10 мин при различной температуре ($350 \div 600^\circ\text{C}$). На тыльную сторону отожженной пластины с алюминиевыми контактами напылялась медь с подслоем ванадия для припайки кристалла к кристаллодержателю.

Для измерения характеристик диодов использовались короткие (длительностью в несколько микросекунд) редко повторяющиеся импульсы (частота повторения 40 Гц) постоянного тока и СВЧ сигнала (частота 37 ГГц) во избежание нагрева кристаллической решетки. Температура диодов изменялась за счет помещения их в поток паров жидкого азота. Интенсивность потока регулировалось изменением температуры электрической нагревательной спирали, помещенной в сосуд Дьюара с жидким азотом. Температура в образце измерялась при помощи термопары медь-константан, помещенной в непосредственной близости к образцу.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при комнатной температуре контактов In- p -Ge и Al- p -Ge в зависимости от температуры их отжига и Au- p -Ge, отожженных при температурах ниже эвтектической (температура эвтектики Au-Ge 356°C [3]), показали, что

во всех случаях ее асимметрия соответствует асимметрии ВАХ антизапирающего контакта: ток, протекающий в прямом направлении (плюс приложенного напряжения — на металле), превышает обратный. Однако, величина асимметрии ВАХ (разности сопротивлений для двух направлений тока) заметно превышает теоретически рассчитанную для плоского $p-p^+$ -перехода круглой формы [5], когда она определяется электрическими параметрами полупроводника в объеме,

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \frac{32[(1+s)\tau_{\mathcal{E}} + \tau_M^n] \mu_0 U R_{s0}^2}{3\pi^2 r_0^2 R_s}, \quad (1)$$

где s — показатель степенной зависимости времени релаксации импульса электронов от напряженности электрического поля; $\tau_{\mathcal{E}}$, μ_0 — время релаксации энергии и подвижность электронов; τ_M^n — время релаксации Максвелла в n -области; r_0 — радиус контакта; R_{s0} — геометрическое сопротивление контакта; $R_s = U/I$, когда ток $I \rightarrow 0$; U — напряжение. Для всех контактов при прямом направлении тока наблюдалось уменьшение электрического сопротивления диодов с ростом напряжения на начальном участке ВАХ. Это уменьшение не может быть объяснено эффектом Пельтье горячих носителей заряда [6], так как время релаксации энергии электронов $\tau_{\mathcal{E}}$ в p -Ge при комнатной температуре равно всего $3.5 \cdot 10^{-12}$ с, что недостаточно для проявления эффекта изменения сопротивления точечного контакта вследствие разогрева носителей заряда внешним электрическим полем. Подобное поведение контактов в электрическом поле при комнатной температуре наблюдалось в работе [7] в случае вплавленного контакта никеля в германий дырочной проводимости. Авторы работы считали, что контакт Ni- p -Ge при $T = 300$ К — антизапирающий, а при его охлаждении появляется барьер Шоттки, обуславливающий возникновение контактного сопротивления. ВАХ контактов Au- p -Ge, отожженных при более высоких температурах, соответствовала ВАХ запирающего контакта: обратный ток (к металлу приложен отрицательный потенциал) превышал прямой.

При температуре жидкого азота проявилось большое разнообразие ВАХ контактов малых размеров в зависимости от контактного металла и температуры их отжига. Контакты In- p -Ge отличались сублинейной ВАХ, хотя ее асимметрия имела противоположный знак нежели при $T = 300$ К. ВАХ контактов Al- p -Ge, отожженных при температуре $T_a = 350^\circ\text{C}$ (температура эвтектики Al-Ge 424°C), соответствовала ВАХ запирающего контакта, а отожженных при температурах, близких к эвтектической и выше нее, — антизапирающего. Неотожженные контакты Au- p -Ge при $T = 80$ К в начальной области ВАХ вели себя как омические контакты: величина асимметрии ВАХ соответствовала теоретически рассчитанной для $l-h$ -перехода [6], а при дальнейшем увеличении напряжения асимметрия уменьшалась и меняла знак. Контакты, отожженные при $T_a < 356^\circ\text{C}$, в низкотемпературной среде вели себя как запирающие, а при $T_a > 356^\circ\text{C}$ знак асимметрии соответствовал ВАХ антизапирающего, хотя ее величина превышала рассчитанную.

Измерения величины детектируемого диодами сигнала U_d показали, что его знак соответствовал знаку асимметрии ВАХ, измеренной

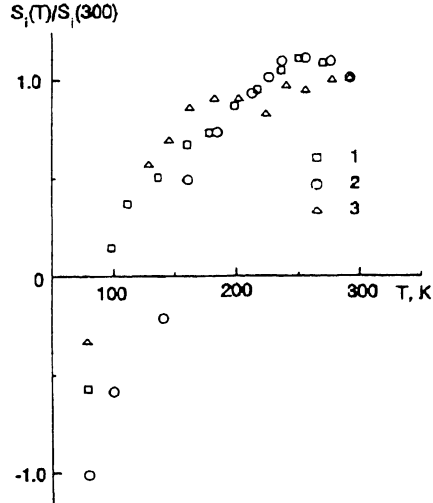


Рис. 1. Температурные зависимости вольт-ваттной чувствительности диодов In-*p*-Ge, отожженных при различных температурах. Удельное сопротивление *p*-Ge 15 Ом·см. Температура отжига T_a , °C: 1 — 300, 2 — 350, 3 — 400. Вольт-ваттная чувствительность при 300 К $S_i(300)$, В/Вт: 1 — 7.1, 2 — 7.0, 3 — 6.7.

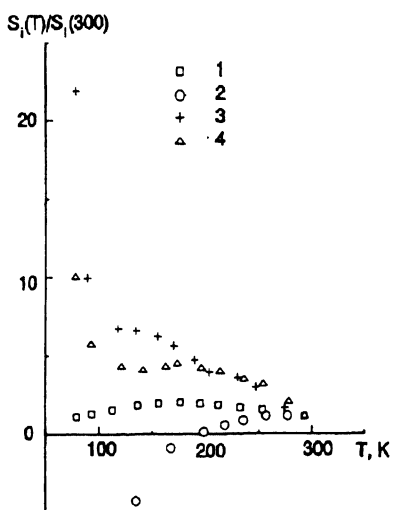


Рис. 3. Температурные зависимости вольт-ваттной чувствительности диодов Au-*p*-Ge. Удельное сопротивление *p*-Ge 30 Ом·см. 1 — неотожженный контакт. Температура отжига T_a , °C: 2 — 330, 3 — 370, 4 — 400. Вольт-ваттная чувствительность при 300 К $S_i(300)$, В/Вт: 1 — 10.2, 2 — 8.6, 3 — 2.8, 4 — 3.6.

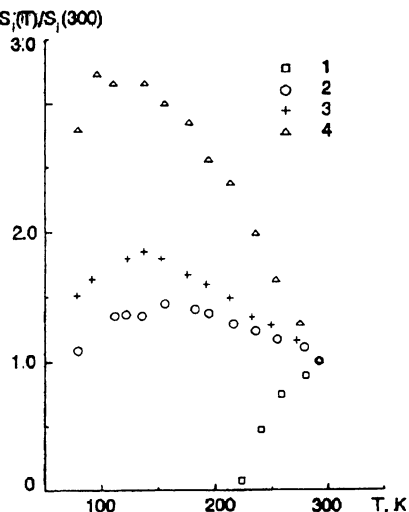


Рис. 2. Температурные зависимости вольт-ваттной чувствительности диодов Al-*p*-Ge, отожженных при различных температурах. Удельное сопротивление *p*-Ge 30 Ом·см. Температура отжига T_a , °C: 1 — 350, 2 — 400, 3 — 450, 4 — 600. Вольт-ваттная чувствительность при 300 К $S_i(300)$, В/Вт: 1 — 2.5, 2 — 12.4, 3 — 8.9, 4 — 3.3.

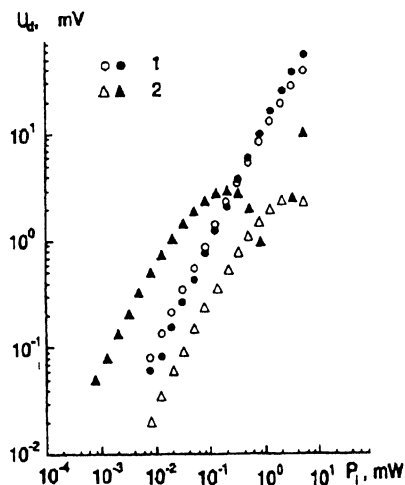


Рис. 4. Вольт-ваттные характеристики диодов Au-*p*-Ge при 300 (светлые точки) и 77 К (темные). 1 — неотожженные контакты, 2 — отожженные при $T_a = 370^\circ\text{C}$.

на постоянном токе. Поведение диода с контактами In-p-Ge в СВЧ поле иллюстрирует рис. 1, где представлена температурная зависимость его вольт-ваттной чувствительности $S_i = U_d/P_i$ (P_i — падающая СВЧ мощность). При $T = 300$ К знак детектируемого сигнала соответствует знаку термоэдс горячих носителей заряда в p-Ge. Вольт-ваттная чувствительность диодов, отожженных при различных температурах, не изменяется примерно до температуры 250 К, т. е. до температуры, где не проявляется заметное контактное сопротивление диода. Понижая температуру, наблюдаем уменьшение чувствительности с последующей сменой знака детектируемого сигнала.

Температурная зависимость вольт-ваттной чувствительности диодов с Al-контактами представлена на рис. 2. Вольт-ваттная чувствительность диода, отожженного при $T_a = 350^\circ\text{C}$, уменьшается с понижением температуры кристаллической решетки и меняет знак. При комнатной температуре кристаллической решетки знак детектируемого сигнала соответствует знаку термоэдс носителей заряда. Отжиг при $T_a = 400^\circ\text{C}$ увеличивает абсолютное значение вольт-ваттной чувствительности. Дальнейшее увеличение температуры отжига контактов уменьшает величину вольт-ваттной чувствительности и усиливает ее температурную зависимость.

Температурная зависимость S_i диодов с Au-контактами, представленная на рис. 3, показывает, что отжиг уменьшает абсолютное значение чувствительности и делает эту зависимость более выраженной. Неотожженный контакт Au-p-Ge примечателен тем, что в исследуемом интервале температур вольт-ваттная чувствительность почти не зависит от температуры. Это свойство контакта Au-p-Ge обуславливает его широкое применение в качестве измерителя СВЧ мощности. Чувствительность диода с контактами, отожженными при $T_a = 330^\circ\text{C}$, с понижением температуры уменьшается. Затем детектируемый сигнал меняет знак на противоположный. Контакты, отожженные при температуре выше 356°C , обладают более слабой температурной зависимостью вольт-ваттной чувствительности в интервале температур $100 < T < 300$ К и резким увеличением S_i при температуре кристаллической решетки ниже 100 К. Особенно отчетливо это выражено для температуры отжига $T_a = 370^\circ\text{C}$, когда значение чувствительности при $T = 80$ К более чем в 20 раз превышает S_i при $T = 300$ К. Кроме того, если зависимость сигнала, детектируемого диодом с неотожженными контактами, от падающей СВЧ мощности квадратична во всем диапазоне исследуемых мощностей как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота, то динамический диапазон диодов с отожженными контактами при $T_a = 370^\circ\text{C}$ становится значительно уже (рис. 4). При $T = 80$ К эта зависимость имеет немонотонный характер — с увеличением падающей СВЧ мощности детектируемый сигнал уменьшается, меняет знак, потом опять увеличивается и вторично меняет полярность (отрицательные значения U_d на рисунке не показаны). Такая зависимость U_d от P_i , по-видимому, обусловлена эффектом охлаждения электронов в греющих электрических полях, как это имеет место в компенсированном антимоноиде индия с примесью хрома [6,8].

ВАХ неотожженного точечного контакта Au-p-Ge при $T = 300$ К показана на рис. 5. Малая площадь контакта при удельном сопротивлении контакта $\rho_c = 9 \cdot 10^{-3}$ Ом см² определяет большую величину контактного сопротивления $R_c = 11500$ Ом, которое в свою очередь влияет на поведение диода как на постоянном токе, так и при

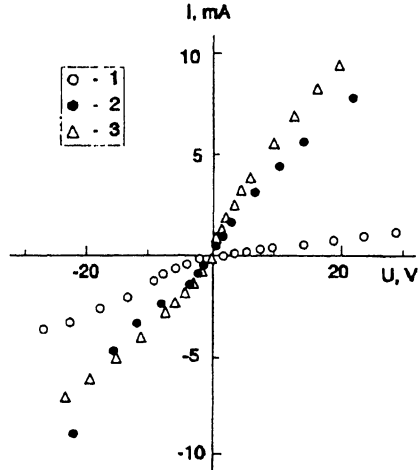


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики диодов Au-p-Ge: 1 — точечный контакт диаметром 10 мкм, 2 — формованный импульсом электрического тока, 3 — контакт в виде узкой полосы с размерами $4 \times 200 \text{ мм}^2$. $R_{\text{с0}}$, Ом: 1 — 14 800, 2 — 2000, 3 — 1580. S_i , В/Вт: 1 — 13,5, 2 — 6,9, 3 — 7,4.

воздействии высокочастотным сигналом. Электроформовка точечного контакта происходила во время измерения его ВАХ импульсами постоянного тока большой длительности. Когда значение обратного напряжения в контакте достигало 32 В, возникала мегагерцовая генерация во время действия импульса и происходило необратимое уменьшение сопротивления контакта. Изменялся вид ВАХ формованного контакта (рис. 5), уменьшались ее симметрия и вольт-ваттная чувствительность, что можно объяснить увеличением площади контакта [9]. Уменьшить влияние контактного сопротивления можно используя специальную конфигурацию контакта — контакт, имеющий форму узкой полоски. На рис. 5 показана ВАХ такого диода. Таким образом, отказавшись от нетехнологичной операции электроформовки, можно получить диод с контактами малых размеров, параметры которого не уступают диоду с формованным точечным контактом.

Из представленных результатов исследований можно заключить, что полученные методом сплавления металла в p-Ge в атмосфере водорода контакты имеют свойства антизапирающих контактов. Термический отжиг контактов, с одной стороны, легирует приповерхностную область полупроводника акцепторной примесью, а с другой — изменяет условия на его поверхности. Как указывается в работе [10], рекомбинационные центры на поверхности германия, связанные с наличием атомов кислорода вблизи границы раздела германий-окись германия, нейтрализуются молекулами воды. Поэтому отжиг германия уже при температуре 100°C увеличивает скорость поверхностной рекомбинации вследствие испарения воды с поверхности полупроводника [10]. Поскольку Au в запрещенной зоне Ge дает глубокие акцепторные уровни, Au-p-Ge более всего чувствительны к термическому отжигу из всех рассматриваемых здесь контактов.

Список литературы

- [1] М.И. Билько, А.К. Томашевский. *Измерение мощности на СВЧ* (М., 1986).
- [2] С. Ашмонтас, А. Сужеделис. *Лит. физ. сб.*, 27, 297 (1987).
- [3] В.М. Глазов, В.С. Земсков. *Физико-химические основы легирования полупроводников* (М., 1967).

- [4] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., 1984) т. 1.
[5] S. Ašmontas, A. Sužiedėlis. *Lithuanian J. Phys.*, **33**, 45 (1993).
[6] С. Ашмонтас. *Электроградиентные явления в полупроводниках* (Вильнюс, 1984).
[7] И. Градаускас, А. Олекас. *Лит. физ. сб.*, **26**, 422 (1986).
[8] S. Ašmontas, L. Subačius, G. Valušis. *Acta Phys. Polon. A*, **84**, 717 (1993).
[9] A.C. Sim. *J. Electron. Control*, **3**, 139 (1957).
[10] А.В. Ржанов, Ю.Ф. Новотоцкий-Власов, И.Г. Неизвестный. *ФТТ*, **1**, 1471 (1959).

Редактор Л.В. Шаронова

A study of small area contacts of different metals to the *p*-type germanium

S. Ašmontas, A. Sužiedėlis

Institute of Physics of Semiconductors, 2600 Vilnius, Lithuania

The investigated contacts of In, Al, Au to *p*-Ge were made by thermal evaporation (In, Al) or electrochemical deposition (Au) of metals and subsequent annealing at different temperatures in hydrogen atmosphere. The current-voltage and voltage-power characteristics of In-*p*-Ge, Al-*p*-Ge and Au-*p*-Ge contacts were studied experimentally with current pulses or microwave radiation within the lattice temperature $80 \div 300$ K. If in the case of In-*p*-Ge contacts the influence of annealing temperature on these dependences is negligible, then for Al and Au contacts the effects are more pronounced. In Au-*p*-Ge diodes the signal depends nonmonotonically on applied microwave power. The current-voltage and voltage-power characteristics of the diodes are influenced by the contacts resistance. We proved that this effect can be diminished by using contacts of narrow-long shape.
