

Снижение омических потерь и повышение мощности фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия

© Ф.Ю. Солдатенков, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков[†],
Ю.М. Задиранов, М.Г. Растегаева, А.А. Усикова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 14 февраля 2011 г. Принята к печати 21 февраля 2011 г.)

С использованием методики TLM (transmission line model) с радиальной и прямоугольной геометрией контактных площадок исследованы контактные системы Cr–Au, Cr–Au–Ag–Au, Ti–Pt–Au, Pt–Ti–Pt–Au, Pt–Au, Ti–Au, Ti–Pt–Ag, Ti–Pt–Ag–Au, Pt–Ag, осажденные на поверхность *p*-GaSb методами магнетронного распыления и резистивного испарения. Установлено, что контактные системы Ti–Pt–Ag–Au и Ti–Pt–Ag характеризуются наиболее низкими значениями удельного переходного контактного сопротивления ($\rho_c \leq 10^{-6}$ Ом · см²), что позволяет использовать их для создания фотоэлектрических преобразователей, генерирующих фототоки до 15 А/см².

1. Введение

С увеличением плотности излучения, падающего на фотоэлемент, неизбежно растут потери на внутреннем сопротивлении фотоэлектрического преобразователя, существенный вклад в которое может вносить сопротивление контакта. Поэтому при конструировании мощных фотоэлементов (3–5 Вт/см²) на основе GaSb, способных эффективно работать в фотоэлектрических и термофотоэлектрических (ТФЭ) системах при высоких кратностях концентрирования солнечного излучения или в ТФЭ генераторах с газовыми горелками при высоких температурах эмиттера, существенное внимание должно уделяться формированию контактов с низким сопротивлением, обладающих хорошей адгезией к полупроводнику. Процедура создания омического контакта и его состав не должны приводить к деградации приборной структуры, например, вследствие глубокого проникновения в GaSb материала контакта в процессе его изготовления или работы фотопреобразователя при повышенных температурах. Среди других требований, предъявляемых к омическим контактам, можно отметить воспроизводимость их электрических свойств, а также однородность характеристик фотоэлемента по площади. Кроме того, существует задача снижения себестоимости контакта при сохранении его качества. При изготовлении приборной структуры важным моментом является также процесс утолщения контактов, необходимый не только для уменьшения их последовательного сопротивления, но и для последующего монтажа элементов в батарею.

В ряде работ [1–7], посвященных разработке технологии изготовления омических контактов к антимониду галлия *p*-типа проводимости, показана возможность использования в качестве контактных покрытий следующих материалов: Au [1,3,5], Au–Zn [1,3,4], TiAu [2], Ag [3], Ag–Zn [3], Al [3], Cr–Au [5,6],

Cr–Ag [6], Cr–Ag(Mn) [6], Ti–Pt–Au [5–7]. Опубликованные данные по величине удельного переходного сопротивления омических контактов (ρ_c) к *p*-GaSb имеют существенный разброс и находятся в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-8}$ Ом · см². Несмотря на разнообразие литературных данных о контактных материалах к антимониду галлия *p*-типа, на практике при изготовлении приборных структур фотоэлементов и светодиодов на основе GaSb достаточно распространенными остаются золотые или золотосодержащие контакты [6,8–10], наносимые с помощью методов резистивного или электронно-лучевого испарения в вакууме с последующим гальваническим осаждением золота.

Несомненный интерес представляет система Ti–Pt–Au, характеризующаяся низким контактным сопротивлением к материалам соединений A^{III}B^V *p*-типа проводимости [11–13]. Подобных результатов можно ожидать и от системы Ti–Pt–Ag. Преимущество данной контактной композиции состоит также в том, что серебро обладает меньшим удельным сопротивлением по сравнению с золотом, что приводит к снижению сопротивления растекания по контакту при сохранении тех же толщин металлизации.

Цель данной работы — проведение исследований по разработке и оптимизации многослойных омических контактов на основе Ti, Pt и Ag (или Au) к фронтальной поверхности (*p*-типа проводимости) высокоэффективных мощных фотопреобразователей на основе GaSb.

2. Получение и исследование омических контактов к фотоэлементам на основе GaSb

2.1. Изготовление образцов и методика измерения удельного переходного контактного сопротивления

Приборная структура фотоэлементов на основе GaSb формировалась методом двухстадийной диффузии цинка

[†] E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

из газовой фазы в подложки n -GaSb. Поверхностная концентрация носителей в диффузионном p -слое составляла $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Особенности технологического цикла изготовления фотопреобразователей рассмотрены ранее в [14,15]. Исследовались фотоэлементы площадью $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$.

В настоящей работе использовались две схемы изготовления контактной сетки на фронтальной поверхности фотопреобразователей. Первый вариант заключался в предварительном напылении „тонкого“ контакта (до 0.3 мкм толщиной) с его последующим гальваническим утолщением золотом до $1.5\text{--}3.0 \text{ мкм}$. По другой схеме (см. далее) применялась двухслойная литография с использованием LOR-резистов (lift-off photoresist), что позволяло осаждать утолщенный многослойный контакт в ходе единого процесса напыления.

Тонкие пленки Ti и Pt получали методом магнетронного распыления (применялись магнетроны постоянного тока), слои Cr, Au и Ag — методом резистивного испарения при давлении остаточных газов в вакуумной камере $\sim 10^{-6} \text{ мм рт.ст.}$

При обработке технологии изготовления контактов применялась методика измерения удельного переходного контактного сопротивления TLM (transmission line model) с использованием радиальной геометрии контактных площадок CTLM (circular contacts TLM) [16–19] или прямоугольной (линейной) геометрии контактных площадок LTLM (linear TLM) [19,20]. Тестовые образцы изготавливались на приборных структурах GaSb-фотоэлементов с диффузионным p - n -переходом. На образцах для измерений по методике CTLM имелась система концентрически расположенных контактных площадок различных радиусов r_1 и r_2 (радиус внутреннего контакта r_1 находился в диапазоне $10\text{--}30 \text{ мкм}$, а радиус внешнего контакта r_2 получали из соотношения $\ln(r_2/r_1) = 2$ [18]). На тестовых образцах для LTLM-измерений изготавливали прямоугольные контактные площадки, расположенные на расстояниях $20, 40, 80$ и 100 мкм друг от друга. При изготовлении образцов для LTLM-измерений применялось дополнительное обтачивание групп контактных площадок до подложки для устранения нежелательных эффектов, связанных с краевым поверхностным растеканием тока. Использование структур с радиальной геометрией контактов позволяло упростить схему изготовления образцов за счет исключения операции их профилирования. Вжигание контактов проводилось в атмосфере чистого водорода или азота. Продолжительность отжига составляла $\sim (15\text{--}60) \text{ с}$.

2.2. Влияние подготовки образцов перед нанесением контактных слоев на характеристики фотоэлементов

Подготовка поверхности структур перед напылением контактов может существенно влиять на электрические характеристики приборов, а также на воспроиз-

димость полученных результатов. Обработка образцов перед напылением производилась одним из следующих способов: отмывка в растворе соляной кислоты, ионно-лучевая очистка поверхности GaSb.

Для создания фронтальных омических контактов к фотоэлементам на основе p -GaSb часто применяется контактная система Cr–Au [6,14,15]. На рис. 1 показаны полученные в данной работе значения удельного сопротивления для таких контактов при различной толщине подслоя Cr. Хром выполняет функцию адгезионного слоя и затрудняет диффузию золота в структуру при вжигании контакта. Для изготовления фотоэлементов с контактами данного типа (обычно толщина слоя хрома не превышала 100 \AA) возможен любой из двух указанных вариантов очистки поверхности p^+ -GaSb. Существенным преимуществом ионно-лучевой обработки является улучшение адгезионных характеристик контактных покрытий. Травление подконтактных областей ионами Ag позволило получать омические контакты на основе Cr–Au с величиной удельного сопротивления $\rho_c < 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (при толщине слоя хрома $< 350 \text{ \AA}$) даже без дополнительного отжига (as deposited). Применение как отмывки в разбавленной соляной кислоте, так и обработки поверхности ионами Ag позволяет воспроизводимо изготавливать фотоэлементы с высокими значениями коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ), $FF > 70\%$. Дополнительный отжиг в диапазоне температур $T = 170\text{--}190^\circ \text{C}$ слабо влияет на величину удельного контактного сопротивления, но способствует улучшению адгезионных характеристик контакта. Выбор достаточно невысокой температуры вжигания ($\sim 170^\circ \text{C}$) обусловлен необходимостью ограничения проникновения в GaSb материала контакта из-за относительно неглубокого залегания ($\sim 0.7\text{--}1.0 \text{ мкм}$) p - n -перехода в подконтактных областях фотоэлемента.

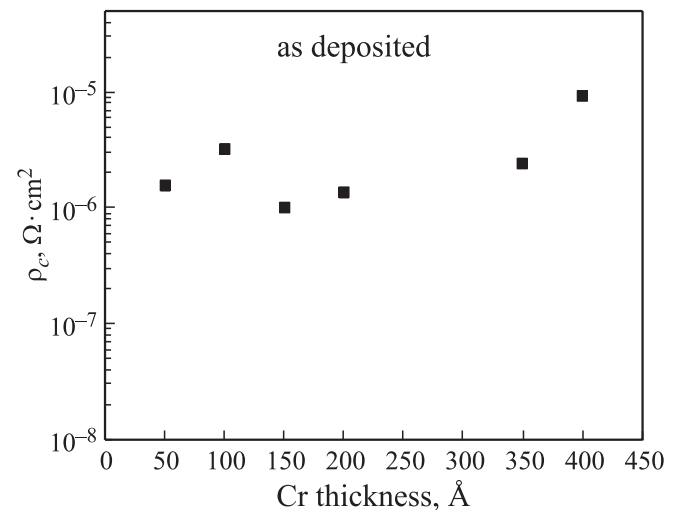


Рис. 1. Удельные контактные сопротивления системы Cr–Au к слоям p^+ -GaSb ($p \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) с различной толщиной подслоя Cr (измерения по методике LTLM).

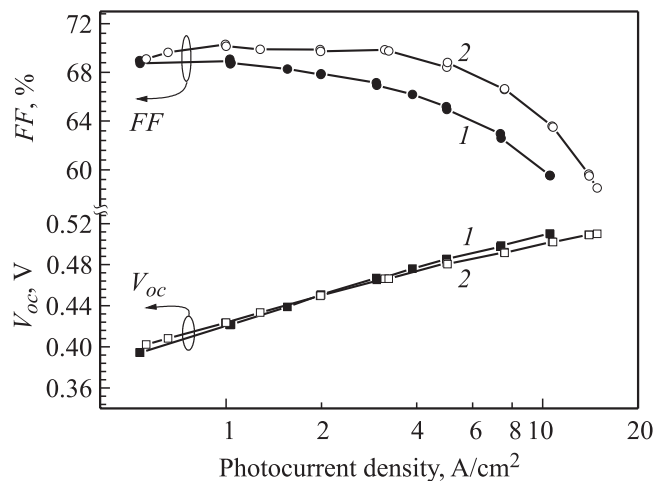


Рис. 2. Зависимости напряжения холостого хода и коэффициента заполнения ВАХ от плотности фототока фотоэлементов на основе GaSb с традиционной химической обработкой поверхности (1) и с ионно-лучевым травлением подконтактных областей (2) перед нанесением фронтального контакта Ti–Pt–Au.

Проведенные исследования показали, что для контактных систем с подслоем титана предпочтительно применение ионно-лучевого травления приповерхностной области p -GaSb перед напылением. Такая обработка способствовала как снижению удельного сопротивления ρ_c , так и усилению адгезии контактных покрытий к полупроводнику по сравнению с жидкостной отмывкой образцов. На рис. 2 представлены зависимости напряжения холостого хода V_{oc} и коэффициента заполнения ВАХ FF от плотности фототока фотоэлементов на основе GaSb, полученных двухстадийной диффузией цинка и различающихся обработкой поверхности перед нанесением фронтальных контактов Ti–Pt–Au. Кривая 1 соответствует элементу с отмывкой поверхности в разбавленной соляной кислоте, а кривая 2 — элементу с ионно-лучевым травлением приповерхностной области. Видно, что при высоких плотностях фототока элементы с локальным ионно-лучевым травлением подконтактных участков имеют большие значения FF по сравнению с образцами с жидкостной обработкой поверхности перед процессом напыления.

2.3. Многослойные контактные системы

В данной работе исследовались различные контактные системы с напылением в качестве граничащего с полупроводником (p^+ -GaSb, концентрация дырок $p \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) слоя Ti или Pt. На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений методом CLTM удельного переходного контактного сопротивления для разных контактных композиций, а на рис. 5 показана зависимость $\rho_c(T)$, аналогичная кривой 1 на рис. 3 для системы Ti–Au, но полученная по LTLM-методике. Как видно из рис. 3–5, наилучшая воспроизводимость результатов и

наиболее высокая температурная стабильность достигаются для системы с большими по толщине слоями Ti и Pt, 30 и 60 нм соответственно (данные 4 на рис. 3). Тем не менее средние значения удельного контактного сопротивления для всех изучаемых систем, за исключением системы Ti–Au, при температуре отжига $T \approx 200^\circ\text{C}$ приблизительно одинаковы. При использовании платины в качестве первого слоя также получались контакты с достаточно низким сопротивлением ($\sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) — см. рис. 4. Однако из-за того, что Pt имеет худшие по сравнению с Ti адгезионные характеристики по отношению к GaSb, такие контактные системы применялись только в исследовательских целях.

На рис. 6 представлены результаты измерений по методике LTLM удельного контактного сопротивления

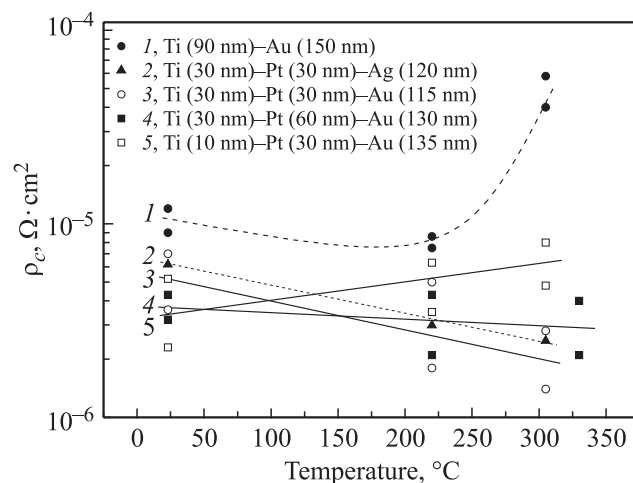


Рис. 3. Удельные контактные сопротивления систем Ti–Au (1), Ti–Pt–Ag (2) и Ti–Pt–Au (3–5) после вжигания в атмосфере водорода (измерения по методике СТЛМ).

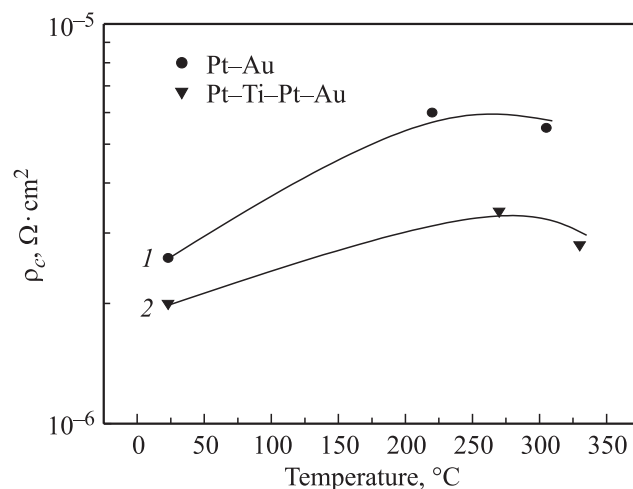


Рис. 4. Удельные контактные сопротивления систем Pt(45 нм)–Au(170 нм) (1), Pt(8 нм)–Ti(20 нм)–Pt(60 нм)–Au(110 нм) (2) после вжигания в атмосфере водорода (измерения по методике СТЛМ).

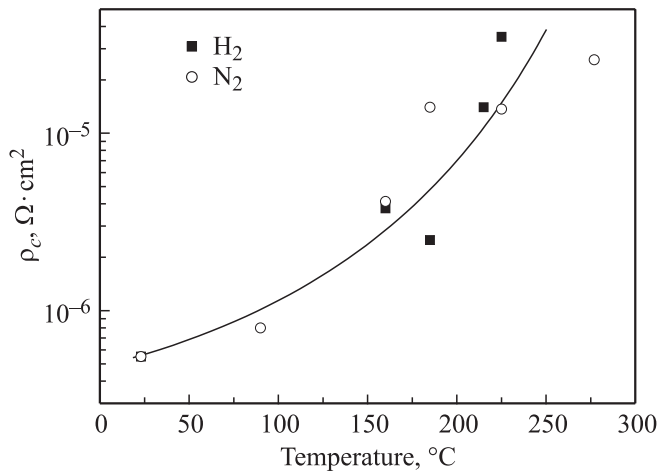


Рис. 5. Удельные контактные сопротивления системы Ti(10 нм)–Au(60 нм) после вжигания в атмосфере водорода и азота (измерения по методике LTLM).

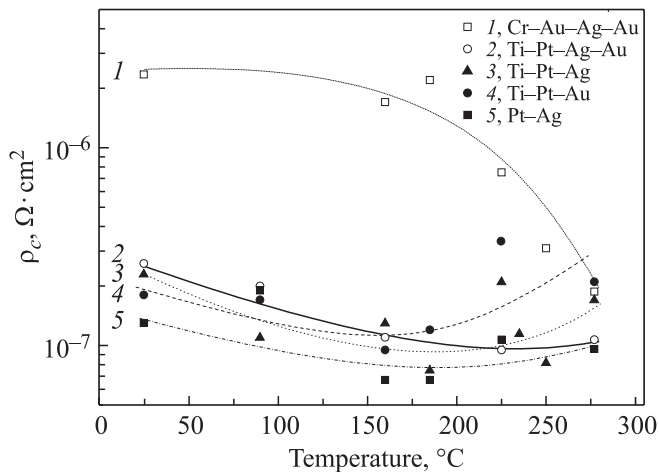


Рис. 6. Удельные контактные сопротивления к слоям p -GaSb ($\rho \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) при разных температурах отжига в атмосфере азота Cr–Au–Ag–Au (1), Ti–Pt–Ag–Au (2), Ti–Pt–Ag (3), Ti–Pt–Au (4), Pt–Ag (5). Измерения по методике LTLM.

образцов, изготовленных с помощью двухслойной литографии (с применением LOR-слоев). Нанесение слоев многослойных контактных композиций проводилось в ходе единого процесса напыления одновременно на образцы для измерения удельного контактного сопротивления и на структуры фотопреобразователей (см. далее в разд. 3). Для формирования фронтальной металлизации к фотоэлементам были выбраны контактные системы с наименьшим сопротивлением — Ti–Pt–Au и Ti–Pt–Ag, а также аналогичные композиции на основе данных материалов (Ti–Pt–Ag–Au, Pt–Ag). Верхний тонкий слой Au в композиции Ti–Pt–Ag–Au наносился для защиты слоя серебра от химического воздействия. Для сравнения с контактами на основе Ti и Pt дополнительно исследовалась система Cr–Au–Ag–Au, которая была

выбрана как модификация традиционно применяемой композиции Cr–Au (рис. 1).

Общая толщина контакта для всех комбинаций металлических слоев составляла $d \approx 0.8\text{--}1.3 \text{ мкм}$. Для всех образцов проводился отжиг в атмосфере азота или водорода в диапазоне температур $90\text{--}280^\circ\text{C}$. На рис. 6 приведены зависимости удельного сопротивления контактных композиций от температуры вжигания в атмосфере азота.

Из рисунка следует, что величины удельного сопротивления для всех выбранных контактных систем, за исключением Cr–Au–Ag–Au, примерно равны и дополнительная термическая обработка в атмосфере азота вплоть до 280°C слабо влияет на величину ρ_c . При отжиге в атмосфере водорода наблюдался больший разброс значений удельного сопротивления контакта: они могли совпадать с величинами, полученными после отжига в атмосфере азота, но могли отличаться в 3–7 раз в большую сторону. Тем не менее все полученные значения удельного сопротивления после отжига в атмосфере водорода от 90 до 280°C были $< 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для контактов Ti–Pt–Au, Ti–Pt–Ag и Pt–Ag.

Из сравнения полученных результатов следует, что LTLM-измерения систематически дают меньшие значения удельного переходного сопротивления контакта по сравнению с данными, полученными методом STLM. Предпосылками к этому служат следующие обстоятельства.

— При измерениях по методике LTLM на лучших образцах (рис. 6) сопротивление зондов совпадало по порядку величины с измеряемыми полными сопротивлениями между контактными площадками (единицы Ом), что вносило большую погрешность в измерения (сопротивление зондов оценивалось при их расположении на одной из контактных площадок на минимальном расстоянии друг от друга). Кроме того, вычисления удельного переходного контактного сопротивления проводились с учетом сопротивления зондов. При измерениях по методике STLM полные сопротивления между контактными площадками были как минимум на порядок больше сопротивления зондов.

— При уменьшении удельного переходного сопротивления омических контактов заметный вклад в общее сопротивление вносит также сопротивление, обусловленное током растекания. С учетом того что удельное сопротивление исследуемых в данной работе слоев p -GaSb составляет $\sim 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, погрешность измерения ρ_c по методике LTLM, связанная с током растекания, может достигать 30% и более [19].

— Из-за особенностей геометрии образцов методика STLM дает оценку величины сопротивления „сверху“ [18], т.е. дает информацию о том, что истинное значение сопротивления контактов не превышает некоторой (измеренной) величины. По мнению авторов [18], применение обеих методик TLM более корректно при измерении значений $\rho_c \geq 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, с ошиб-

кой $\sim (15-20)\%$, которая возрастает при уменьшении сопротивления контактов.

Таким образом, есть основания считать, что полученные по методике СТЛМ данные являются завышенными, а по методике LTLM — заниженными значениями удельного переходного контактного сопротивления, и реальные значения ρ_c лежат между величинами удельного переходного контактного сопротивления, полученными с использованием указанных методик.

2.4. Смещение границы металл–полупроводник при отжиге контакта

При формировании приборной структуры режим отжига контактов выбирается из условий минимизации удельного переходного сопротивления, не приводящего в то же время к возрастанию токов утечки или уменьшению напряжения холостого хода фотоэлектрического преобразователя. Было установлено, что для стандартных условий изготовления GaSb-фотопреобразователя с контактом на основе Cr–Au (т.е. при вжигании при температуре 170°C) граница металл–полупроводник обычно смещается на $\sim (30-50)$ нм. Глубина проникновения контакта Cr–Au в полупроводник при фиксированном режиме отжига также зависит от толщины слоя хрома, способа подготовки поверхности образца перед напылением, воспроизводимости параметров нанесения слоев металла. Нагрев фотоэлемента в процессе эксплуатации оказывает дополнительное влияние на смещение границы металл–полупроводник.

При более жестких условиях отжига ($T > 300^\circ\text{C}$) смещение границы металл–полупроводник от поверхности подложки достигает 500 нм и более. Снимок скола образца GaSb с контактом Cr–Au после вжигания при $T = 320^\circ\text{C}$ в атмосфере водорода показан на рис. 7, а. Снимок получен с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

При отжигах систем Ti–Pt–Ag и Ti–Pt–Au до 200°C не замечено существенного проплавления полупроводника контактом. При более высоких температурах может происходить незначительное проникновение металла в полупроводник. На рис. 7, б приведен РЭМ-снимок скола образца GaSb с многослойным контактом Ti–Pt–Ag после вжигания в атмосфере водорода при $T = 305^\circ\text{C}$, значительно превышающей оптимальный диапазон температур. Видно, что глубина проникновения металла в полупроводник не превышает 20 нм.

3. Характеристики фотоэлектрических преобразователей

В данной работе в большинстве экспериментов полосковые контакты на фронтальной стороне фотопреобразователя формировались с помощью метода взрывной фотолитографии с использованием LOR-резистов. Т-образ-

ный профиль стенок резиста (рис. 8) позволяет создать разрывы между материалом, напыляемым на полупроводник и на маску из фоторезиста, что облегчает его удаление и позволяет добиться ровной стенки полоска.

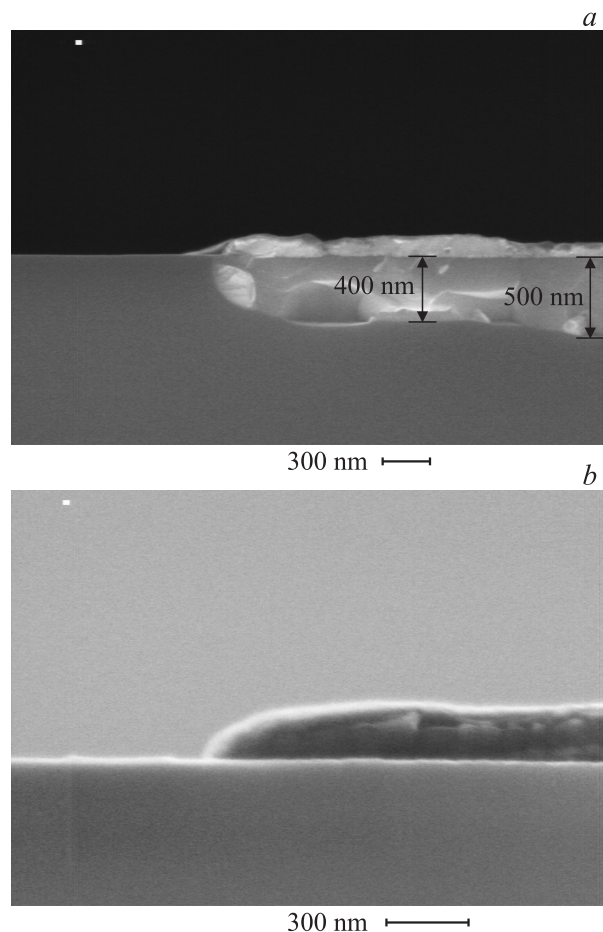


Рис. 7. РЭМ-снимки скола структуры GaSb с многослойным контактом после отжига при температуре $T \approx 300^\circ\text{C}$: а — Cr(10 нм)–Au(170 нм); б — Ti(15 нм)–Pt(15 нм)–Ag(180 нм). Толщины слоев металла указаны до отжига.

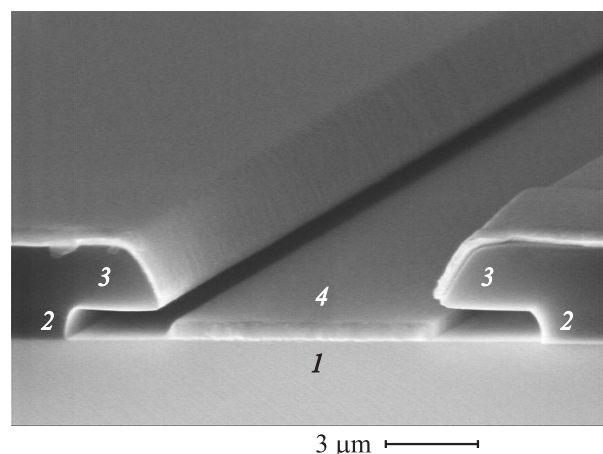


Рис. 8. РЭМ-снимок скола приборной структуры (1) с LOR-слоем (2) и фоторезистом (3) после напыления контактных слоев Ti–Pt–Ag (4).

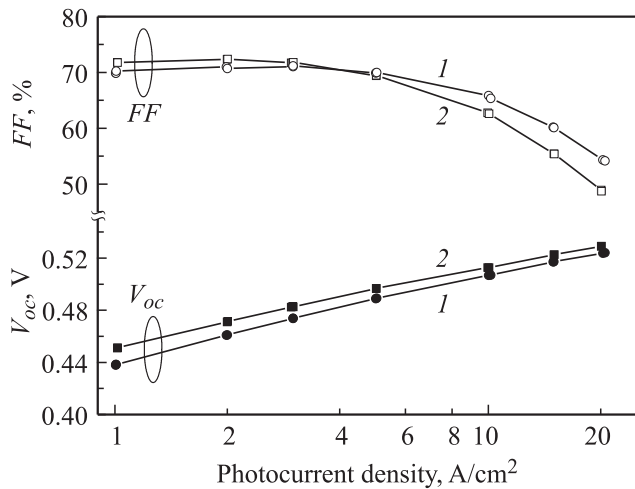


Рис. 9. Зависимости коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики FF и напряжения холостого хода V_{oc} от плотности фототока фотоэлектрического преобразователя с разными контактными структурами: 1 — Cr–Au с гальванически осажденным Au ($d \approx 1.9$ мкм); 2 — Ti–Pt–Ag–Au ($d = 0.95$ мкм).

Применение LOR-слоев обеспечивает более стабильный уровень процесса взрывной литографии при напылении толстых металлических пленок, что дает возможность изготавливать приборные структуры без дополнительного электролитического утолщения контакта.

На рис. 9 представлены характеристики фотоэлектрических преобразователей с разными контактными структурами. Кривая 1 соответствует контакту, который изготавливался в два этапа по традиционной схеме — напыление Cr–Au ($d = 0.26$ мкм) с последующим гальваническим осаждением Au до общей толщины 1.9 мкм. Характеристики фотопреобразователя с контактной структурой Ti–Pt–Ag–Au, полученной в ходе единого процесса напыления (общая толщина контакта 0.95 мкм), представлены кривой 2. Элементы изготовлены без вжигания контактов. При относительно низких значениях плотности фототока, $\sim (1-3)$ А/см², структуры с Ti–Pt–Ag–Au-контактной сеткой характеризуются большими значениями FF по сравнению с „традиционными“ элементами с металлизацией на основе Cr–Au. Улучшение параметров ВАХ элемента с Cr–Au-металлизацией при высоких плотностях тока может быть связано со значительно большей (почти в 2 раза) толщиной контакта.

Использование контактной структуры Ti–Pt–Ag дает возможность:

а) изготовления фотопреобразователей с высокими значениями фактора заполнения ВАХ и с сильной адгезией металла к поверхности полупроводника;

б) упрощения технологии за счет исключения операции по гальваническому осаждению золота, включающей также проведение дополнительного фотолитографического процесса (при дополнительном утолщении

металлических слоев происходит разрастание контакта в ширину, что в свою очередь увеличивает затенение светочувствительной поверхности структуры фотоэлемента; применение LOR-слоя значительно упрощает процесс удаления фоторезиста после напыления металла (это позволяет добиться ровной стенки полоска контакта);

в) формирования неглубоко лежащей планарной границы раздела металл–полупроводник, необходимой при изготовлении приборной структуры с мелким $p-n$ -переходом в подконтактных областях;

г) снижения себестоимости и уменьшения сопротивления контакта за счет замены золота на серебро (это становится ощутимым при производстве концентраторных фотоэлектрических преобразователей с „толстыми“ контактными слоями, > 1 мкм).

На рис. 10 показаны характеристики фотоэлементов с описанными выше контактными структурами, сформированными напылением толстых металлических пленок без дополнительного гальванического утолщения металлизации (см. рис. 6). Общая толщина контактов, как указывалось выше, составляла $d = 0.8-1.3$ мкм. Как следует из характеристик, представленных на рис. 10, наибольшими значениями FF при малых плотностях тока (~ 1 А/см²) обладают фотоэлементы с контактами Ti–Pt–Ag и Ti–Pt–Ag–Au. С увеличением плотности излучения, падающего на фотоэлемент, разброс значений FF для структур с разным типом многослойных контактов возрастает. Фотоэлементы с контактной сеткой на основе Cr–Au–Ag–Au имеют наименьшие значения FF , что может быть связано с большими значениями ρ_c для данной контактной системы. Для сравнения приведены характеристики фотоэлементов с контактами Ti–Pt–Au, изготовленными по двум разным техноло-

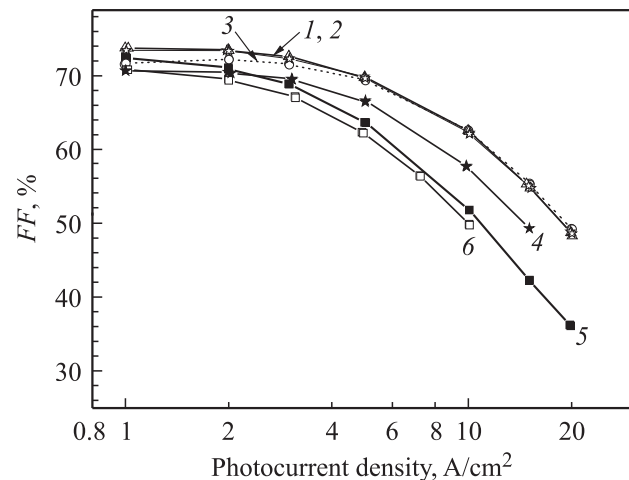


Рис. 10. Зависимости коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики от плотности фототока фотоэлектрического преобразователя с разными контактными структурами: 1 — Ti–Pt–Ag–Au; 2 — Ti–Pt–Ag; 3 — Pt–Ag; 4 — Ti–Pt–Au, напыленный контакт; 5 — Ti–Pt–Au, контакт с гальваническим осаждением золота; 6 — Cr–Au–Ag–Au.

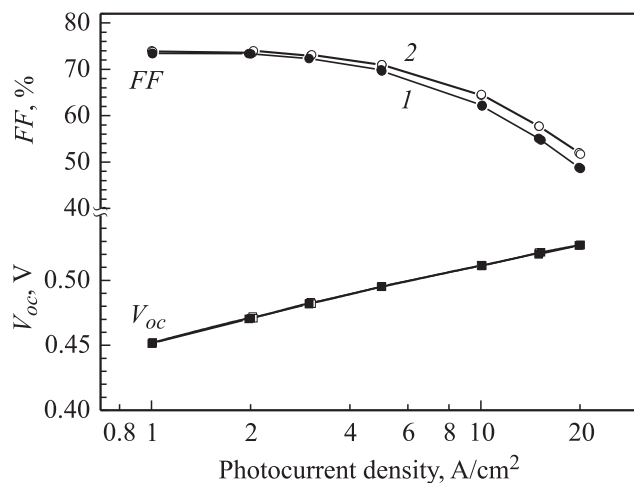


Рис. 11. Зависимости напряжения холостого хода V_{oc} и коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики FF от плотности фототока фотоэлектрического преобразователя с контактной структурой на основе Ti–Pt–Ag: 1 — без дополнительного вжигания; 2 — вжигание контактов в атмосфере водорода при температуре 170°C.

гическим схемам. Значения коэффициента заполнения ВАХ фотоэлемента с контактом толщиной 0.8 мкм, нанесенным в ходе единого процесса напыления, показаны кривой 4. Кривая 5 соответствует значениям FF для фотопреобразователя с металлизацией, сформированной в два этапа: предварительное напыление тонкого (общей толщиной ~ 0.2 мкм) контакта Ti–Pt–Au и последующее гальваническое осаждение золота до суммарной толщины 1.2 мкм. Все фотоэлементы (рис. 10) изготовлены без вжигания контактов.

Эксперименты показали, что вжигание структур с контактными системами всех типов при температуре 170°C в атмосфере водорода слабо влияло на параметры фотоэлементов и лишь в редких случаях приводило к незначительному улучшению параметров ВАХ. На примере системы Ti–Pt–Ag (рис. 11) показано изменение параметров фотоэлементов до и после вжигания в указанных условиях. Тем не менее для контактных систем с подслоем титана водородная атмосфера не является оптимальной и может приводить к деградации контакта. Атмосфера азота представляется более подходящей для термической обработки указанных структур. Серия экспериментов показала, что отжиг при температурах 170–180°C в атмосфере азота также заметно не влияет на ВАХ фотоэлементов для всех типов исследованных контактов. Соответствующие кривые до и после вжигания в атмосфере азота для системы Ti–Pt–Ag полностью совпадают и поэтому не показаны на рис. 11.

4. Заключение

Контактные системы Ti–Pt–Ag–Au и Ti–Pt–Ag обеспечивают планарную и мелкую границу металл–

полупроводник при достаточно низких значениях удельного переходного контактного сопротивления ($\rho_c \leq 10^{-6}$ Ом·см²). По сравнению с золотосодержащими контактами для фотопреобразователей на основе GaSb меньшее удельное сопротивление серебра позволяет снизить сопротивление растекания по контактной сетке прибора при сохранении тех же толщин металлизации. Контактные структуры на основе Ti–Pt–Ag и Ti–Pt–Ag–Au могут использоваться при изготовлении фотоэлектрических преобразователей, работающих при высоких плотностях фототока (10–15 А/см²).

Обычно применяемая при изготовлении высокоточных фотоэлементов операция дополнительного электрохимического утолщения контактной сетки может быть исключена из технологического цикла при использовании двухслойной литографии, позволяющей наносить относительно толстые (> 1 мкм) многослойные контакты (в нашем случае — на основе серебра) в ходе единого процесса напыления. Кроме того, замена золота на серебро дает возможность снизить себестоимость контакта, что важно при массовом производстве фотоэлементов.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В.М. Андрееву за внимание к работе и полезные дискуссии, Н.А. Калюжному, О.Ю. Серебренниковой, С.И. Трошковой за помощь в проведении экспериментов и измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-08-00243-а).

Список литературы

- [1] С.Н. Heinz. J. Electronics, **54** (2), 247 (1983).
- [2] A. Subekti, V.W. Chin, T.L. Tansley. Solid-State Electron., **39** (3), 329 (1996).
- [3] A.G. Milnes, M. Ye, M. Stam. Solid-State Electron., **37** (1), 37 (1994).
- [4] J.B.V. Oliveira, C.A. Olivieri, J.C. Galzerani, A.A. Pasa, F.C. de Prince. J. Appl. Phys., **66** (11), 5484 (1989).
- [5] B. Tadayon, C.S. Kyono, M. Fatemi, S. Tadayon, J.A. Mittemeder. J. Vac. Sci. Technol. B, **13**, 1 (1995).
- [6] В.П. Хвостиков, М.Г. Растегаева, О.А. Хвостикова, С.В. Сорокина, А.В. Малевская, М.З. Шварц, А.Н. Андреев, Д.В. Давыдов, В.М. Андреев. ФТП, **40** (10), 1275 (2006).
- [7] A. Vogt, H.L. Hartnagel, G. Mische, H. Fuess, J. Schmitz. J. Vac. Sci. Technol. B, **14** (6), 3514 (1996).
- [8] A.W. Bett, S. Keser, G. Stollwerck, O.V. Sulima, W. Wettling. 26 IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Anaheim, USA, 1997) p. 931.
- [9] А.Л. Закгейм, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.Е. Черняков, А.А. Шленский. ФТП, **43** (5), 689 (2009).
- [10] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 996 (2003).
- [11] G.E. Bulman, G.F. Gwilliam III, F.A. Chambers. J. Electrochem. Soc., **136** (8), 2423 (1989).

- [12] G. Stareev, H. Künzel, G. Dortmann. J. Appl. Phys., **74** (12), 7344 (1993).
- [13] V. Malina, K. Vogel, P. Ressel, W.O. Barnard, A. Knauer. Semicond. Sci. Technol., **12**, 1298 (1997).
- [14] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. ФТП, **43** (5), 695 (2009).
- [15] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.R. Larionov, V.D. Rummyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts, V.I. Vasil'ev, A.S. Vlasov, O.I. Chosta. Proc. 5th Eur. Space Power Conf. (Tarragona, Spain, 1998) p. 527.
- [16] G.K. Reeves. Solid-State Electron., **23** (5), 487 (1980).
- [17] G. Boberg, L. Stolt, P.A. Tove, H. Norde. Physica Scripta, **24**, 405 (1981).
- [18] А.Н. Андреев, М.Г. Растегаева, В.П. Растегаев, С.А. Решанов. ФТП, **32**, 832 (1998).
- [19] В.Н. Шеремет. Изв. вузов. Радиоэлектроника, **53** (3), 3 (2010).
- [20] H.H. Berger. Solid-State Electron., **15**, 145 (1972).

Редактор Л.В. Шаронова

Reducing of ohmic losses and power increase in GaSb photoconverters

F.Y. Soldatenkov, S.V. Sorokina, N.Kh. Timoshina,
V.P. Khvostikov, Y.M. Zadiranov, M.G. Rastegaeva,
A.A. Usikova

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A study of the contact structures Cr–Au, Cr–Au–Ag–Au, Ti–Pt–Au, Ti–Au, Pt–Ti–Pt–Au, Pt–Au, Ti–Pt–Ag, Ti–Pt–Ag–Au, Pt–Ag deposited on the *p*-GaSb surface by means of magnetron sputtering and resistive evaporation has been performed with the use of the TLM (transmission line model) method with circular and rectangular contact pad geometries. It has been derived, that contact systems Ti–Pt–Ag–Au and Ti–Pt–Ag possess lower values of the specific contact resistance ($\rho_c \leq 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$), which allows to use them for manufacturing of photovoltaic cells, working at current densities up to 15 A/cm².