

06.1;06.2;12

Применение несплавного омического контакта Cr/Au в технологии изготовления планарного арсенидгаллиевого $p-i-n$ -диода балочного типа

© С.Е. Александров, В.В. Волков, В.П. Иванова,
Ю.С. Кузьмичев, Ю.В. Соловьев

ЗАО «Светлана–Электронприбор»
С.-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 20 января 2005 г.

Проведено исследование электрофизических параметров омических контактов Cr/Au на основе арсенида галлия в планарных $p-i-n$ -диодах балочного типа. Величина приведенного контактного сопротивления омического контакта при комнатной температуре составила $2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Показано, что параметры созданных планарных $p-i-n$ -диодов балочного типа позволяют использовать их в качестве ограничительных элементов защитных устройств радиолокационных станций.

Введение. При изготовлении ограничительных арсенидгаллиевых $p-i-n$ -диодов балочного типа для работы в миллиметровом диапазоне длин волн возрастают требования к их основным электрофизическим параметрам — последовательному сопротивлению и емкости. Снижение емкости можно достичь путем уменьшения активной области („меза“-структуры) диода, однако это, в свою очередь, приводит к возрастанию последовательного сопротивления металл–полупроводник. Для эпитаксиальных $p-i-n$ -структур на основе арсенида галлия в качестве омического контакта к эпитаксиальным слоям p -типа проводимости используют Zn/Au и AuBe–Au, которые обеспечивают приведенные контактные сопротивления не более $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, однако ослабленная адгезия данных материалов к эпитаксиальным слоям

не позволяет обеспечить жесткость крепления балочного вывода в технологии изготовления $p-i-n$ -диода.

В данной работе исследуется возможность использования несплавного омического контакта Cr/Au к эпитаксиальному слою арсенида галлия p -типа проводимости. Показано, что применение Cr/Au омического контакта обеспечивает малые значения приведенного контактного сопротивления ($2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$) и надежную адгезию металл-полупроводник. Разработанная технология успешно внедрена при изготовлении планарного $p-i-n$ -диода миллиметрового диапазона длин волн с балочными выводами на основе арсенида галлия.

Экспериментальная часть. Как известно из литературных данных [1–3], наиболее простой способ получения омического контакта заключается в приведении металлического слоя в контакт с сильнолегированной областью. В ходе проведения работы были проведены исследования электрофизических параметров несплавного омического контакта Cr/Au к сильнолегированному эпитаксиальному слою арсенида галлия p -типа проводимости.

Серии экспериментов проводились на эпитаксиальных тестовых структурах, выращенных методом газофазной эпитаксии (MOCVD) на полуизолирующей подложке GaAs (АГЧП-8), со следующими характеристиками:

- толщина p^+ -слоя $h = 0.3 \mu\text{m}$ ($N_{p^+} = 1-2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$),
- толщина базового $n(i)$ -слоя $h = 1 \mu\text{m}$ ($N_{n(i)} = 1 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$).

Технологический процесс изготовления тестовых структур металл-полупроводник, адаптированный к процессу изготовления рабочих диодов, включая в себя формирование омических контактов с использованием магнетронного (Cr, $h = 0.1 \mu\text{m}$) и вакуумно-термического напыления (Au, $h = 0.2 \mu\text{m}$) металлизации и „взрывной“ фотолитографии. Формирование „меза“-структуры производилось жидкостным травлением в перекисно-аммиачном травителе ($\text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O} 1 : 1 : 20$) до полуизолирующей подложки. Контроль травления осуществлялся методом пробивного напряжения между зондами по поверхности эпитаксиального слоя. Определение электрофизических параметров омических контактов к эпитаксиальным слоям p^+ -типа проводимости проводилось с помощью „метода длинной линии“ (МДЛ) [4].

Результаты и обсуждение. Результаты измерения электрофизических параметров омических контактов к p^+ -слою GaAs представлены в таблице. Вольт-амперные характеристики исследуемых образцов имели

Электрофизические параметры несплавных омических контактов Cr/Au к эпитаксиальному слою p^+ -GaAs

Структура верхнего контактного слоя (толщина, уровень легирования)	Контактная металлизация	Режим вжигания	Типичные значения контактного сопротивления ρ_c , $\Omega \cdot \text{cm}^2$
p^+ -GaAs ($0.3 \mu\text{m}$, $1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	Cr/Au ($0.1/0.2 \mu\text{m}$)	—	$(6-7) \cdot 10^{-6}$
p^+ -GaAs ($0.3 \mu\text{m}$, $1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	Cr/Au ($0.1/0.2 \mu\text{m}$)	420°C , 30 min атмосфера H_2	$(3-5) \cdot 10^{-6}$
p^+ -GaAs ($0.3 \mu\text{m}$, $2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	Cr/Au ($0.1/0.2 \mu\text{m}$)	—	$(4-5) \cdot 10^{-6}$
p^+ -GaAs ($0.3 \mu\text{m}$, $2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	Cr/Au ($0.1/0.2 \mu\text{m}$)	420°C , 30 min атмосфера H_2	$(2-4) \cdot 10^{-6}$

линейный характер зависимости без выполнения технологической операции вжигания.

Для предотвращения диффузии хрома в золото, которая возникает при температуре выше 300°C , после напыления металлизации Cr/Au проводилось осаждение гальванического золота толщиной 4 микрона. Диффузия хрома в эпитаксиальные слои арсенида галлия p -типа проводимости при данной температуре и времени проведения процесса является незначительной [5]. После отжига омических контактов при температуре $T = 420^\circ\text{C}$ в атмосфере водорода в течение 30 min наблюдалось уменьшение значений приведенного контактного сопротивления, при этом адгезия омического контакта к эпитаксиальному слою позволяла обеспечить необходимую жесткость балочного вывода диода.

Из представленных данных видно, что несплавные омические контакты Cr/Au имеют сопоставимые значения приведенных контактных сопротивлений ($\rho_c^{\text{Cr/Au}} = 2-4 \cdot 10^{-6} \Omega$) по сравнению с Au/Be сплавными контактами ($\rho_c^{\text{Au/Be}} = 2-5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$) [6-8]. Отличительной особенностью Cr/Au контактов является надежная адгезия металл-полупроводник, что позволяет обеспечить необходимую жесткость балочного вывода в технологии изготовления $p-i-n$ -диода на основе арсенида галлия.

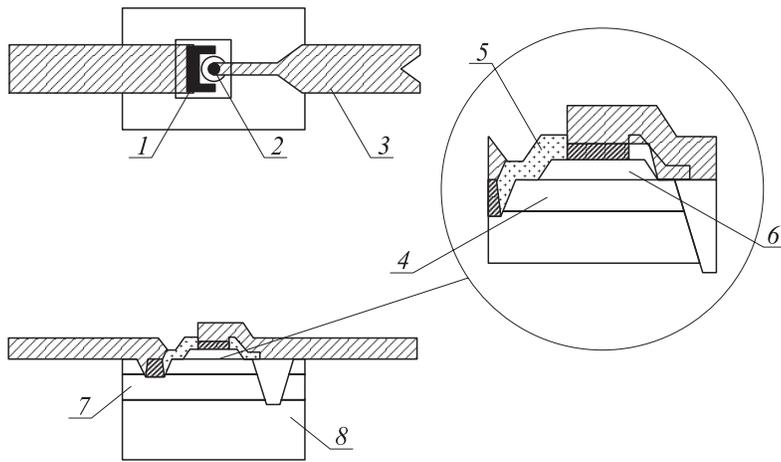


Рис. 1. Планарный $p-i-n$ -диод балочного типа на основе арсенида галлия: 1 — омический контакт к n^+ -эпитаксиальному слою GaAs, 2 — омический контакт к p^+ -эпитаксиальному слою GaAs, 3 — балочный вывод диода, 4 — $n(i)$ -эпитаксиальный слой GaAs, 5 — диэлектрический слой SiO_2 , 6 — p^+ -эпитаксиальный слой GaAs, 7 — n^+ -диэлектрический слой GaAs, 8 — полуизолирующая подложка GaAs.

В ходе настоящего исследования были изготовлены $p-i-n$ -диоды балочного типа, пригодные для использования в миллиметровом диапазоне длин волн. При этом была разработана планарная конструкция с формированием „воздушных“ мостов (рис. 1), позволяющая реализовать малые размеры активной области прибора. Выбор конструкции диода обусловлен двумя причинами. С одной стороны, балочная конструкция обеспечивает простоту монтажа прибора в волноводно-щелевую линию СВЧ-тракта, с другой стороны, конструкция диода с „воздушным“ мостом позволяет снизить долю паразитной удельной емкости металлизации балочных выводов и тем самым уменьшить емкость прибора в целом [9]. Рабочая эпитаксиальная структура выращивалась на полуизолирующей подложке арсенида галлия (АГЧП 8) методом MOCVD и состояла из следующих слоев: скрытый n^+ -слой толщиной $5 \mu\text{m}$, легированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), базовый $n(i)$ -слой толщиной $1 \mu\text{m}$, p^+ -слой толщиной $0.3 \mu\text{m}$, легированный Be ($1-2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Для формирования „меза“-структур применяли жидкостное травление. Пас-

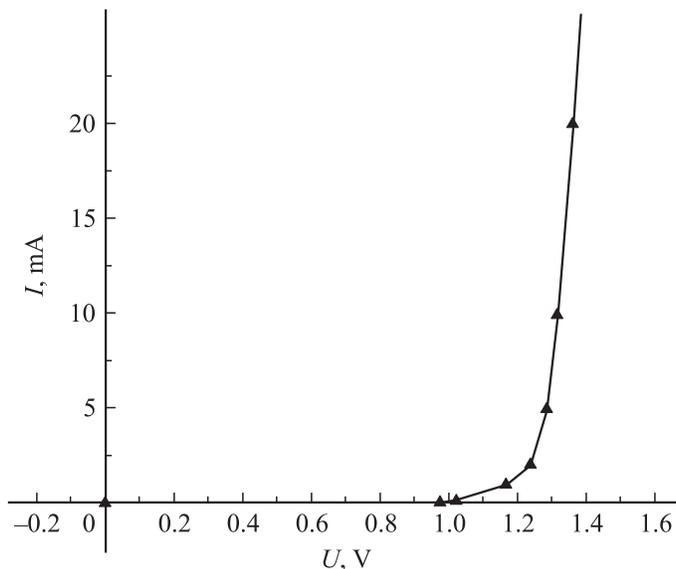


Рис. 2. Типичная вольт-амперная характеристика планарного $p-i-n$ -диода. Электрофизические параметры планарного $p-i-n$ -диода на основе GaAs (толщина базового слоя $n(i) = 1 \mu\text{m}$): $R_d = 4-5 \Omega$ ($I_{dir} = 10 \text{ mA}$), $U_{dis} = 33 \text{ V}$ ($I_{inv} = 0.01 \text{ mA}$), $C_0 = 0.015-0.017 \text{ pF}$.

сивация $p-n$ -перехода осуществлялась диоксидом кремния. Омический сплавной контакт AuGe–Ni–Au формировался к эпитаксиальному слою n^+ -типа проводимости, несплавной Cr/Au к эпитаксиальному слою p^+ -типа проводимости. Процесс изготовления прибора завершался формированием воздушных мостов и разделением кристаллов. На рис. 2 представлена типичная ВАХ планарного $p-i-n$ -диода. Основные электрофизические параметры прибора имели следующие значения: последовательное сопротивление $R = 4-5 \Omega$ ($I = 10 \text{ mA}$) и емкость при нулевом смещении $C^{(0)} = 0.015-0.017 \text{ pF}$.

Испытание арсенидгаллиевых балочных $p-i-n$ -диодов в качестве элементной базы защитных устройств на высоком уровне мощности (ВУМ) показали, что приборы в миллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda = 3-8 \text{ mm}$) обеспечивали работоспособность при импульсных мощностях до 100 W , потери пропускания при этом не превышали 1 dB , а вносимое затухание в режиме ограничения составляло 12 dB .

Выводы. Применение несплавного омического контакта Cr/Au позволяет реализовать малые значения приведенного контактного сопротивления металл–полупроводник $\rho_c = 2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Внедрение технологии формирования омического контакта Cr/Au при изготовлении планарного балочного $p-i-n$ -диода на основе арсенида галлия позволяет реализовать высокий процент выхода годных кристаллов по электрофизическим параметрам и обеспечить надежную адгезию для обеспечения необходимой жесткости балочного вывода диода. Разработанные планарные $p-i-n$ -диоды балочного типа отвечают требованиям работы в качестве элементной полупроводниковой базы в защитных устройствах РЛС миллиметрового диапазона длин волн.

Список литературы

- [1] *Sung J.* // J. of Crystal Growth. 1997. V. 178. P. 445–458.
- [2] *Wood C.* // J. of Crystal Growth. 1995. V. 150. N 3. P. 281.
- [3] *Haragawa O.* J. of Crystal Growth. 1995. V. 154. N 3. P. 231.
- [4] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия / Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 327 с.
- [5] *Слуднов Б.Е.* // ФТП. 2004. Т. 3. В. 38. С. 274–277.
- [6] *Sanada T., Wada O.* // Japan. J. of Appl. Phys. 1980. V. 19. N 8. P. 491–494.
- [7] *Piotrowska A., Guivarch A., Pelous G.* // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. N 3. P. 179–197.
- [8] *Естигнеев С.В., Шипицын Д.С.* // Физическое образование в вузах. 1999. Т. 5. № 1. С. 85–90.
- [9] *Чижун В.В.* // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1991. В. 8 (442). С. 13–15.