

Образование омического контакта в процессе непрерывного нагревания диодов Шоттки на основе GaAs и GaP

© Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе

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

(Получена 28 июля 1997 г. Принята к печати 31 июля 1997 г.)

Изучалось изменение характеристик ток–напряжение и емкость–напряжение контактов полупроводник–твердый металл (диодов Шоттки GaAs–Ni и GaP–Au) в процессе их непрерывного нагревания. Установлено, что при некоторой температуре вентильные контакты переходят в омические. Такой переход происходит еще до возможного образования рекристаллизованного слоя, характерного для традиционного омического контакта. Температура перехода T_{ohm} была существенно ниже температуры плавления металла. Исследование вольт–амперных характеристик этих структур, отожженных при различных температурах T_{ann} и охлажденных до комнатной температуры, показало, что при T_{ann} , меньших некоторой критической температуры T_0 , свойства структуры практически не изменяются, при $T_{ohm} > T_{ann} > T_0$ структуры остаются вентильными, но в них появляются избыточные токи, а при $T_{ann} > T_{ohm}$ структуры необратимо становятся омическими. Предполагается, что после химического взаимодействия металла и приповерхностного слоя полупроводника вновь образованная поверхность приобретает свойства, обеспечивающие омические характеристики контакта металл–полупроводник.

1. Как известно, непосредственный контакт полупроводник–металл будет вентильным (диод Шоттки), если между металлом и полупроводником имеется туннельно–непрозрачный потенциальный барьер, и омическим, если потенциальный барьер отсутствует или он туннельно прозрачен (см., например, [1,2]). Барьер может образовываться за счет различия работ выхода полупроводника и металла (модель Шоттки) или за счет большой концентрации поверхностных состояний, расположенных в запрещенной зоне полупроводника (модель Бардина). Для большинства полупроводников $A^{III}B^V$ выполняется модель Бардина.

В наших работах [3,4] на примере структур полупроводник–жидкий металл (GaP–Ga, GaP–In и GaAs–Ga) было установлено, что вентильный контакт переходит в омический в процессе непрерывного нагревания структуры, после того как произойдет растворение приповерхностного слоя полупроводника в металле. Температура перехода контакта полупроводник–жидкий металл от вентильного к омическому существенно зависит от кристаллографической ориентации поверхности полупроводника и не зависит от концентрации электронов в нем.

В настоящей работе приводятся результаты исследования перехода вентильных контактов полупроводник–твердый металл (диоды Шоттки GaAs–Ni и GaP–Au) в омические при температурах нагрева, существенно меньших температуры плавления металла.

2. Для создания этих структур использовались эпитаксиальные слои n -GaAs (с концентрацией носителей $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$), выращенные на подложках из n -GaAs ($n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$), и пластинки n -GaP ($n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Все кристаллы были ориентированы в плоскости (100). Вначале изготавливался омический контакт вплавлением таблетки In в подложку GaAs и в пластинку GaP. Противоположная поверхность (эпитаксиальный слой в случае

GaAs) обрабатывалась обычным для изготовления вентильных поверхностно–барьерных структур способом: механическая полировка, химическое травление, промывка. Затем на обработанную поверхность химическим способом [5,6] наносился слой Ni (на GaAs) или слой Au (на GaP). Исходные структуры были вентильными.

Для исследования изменения свойств диодов Шоттки часть структур непрерывно нагревалась с малой скоростью (менее 5 град/мин) в нейтральной среде (гелий) от

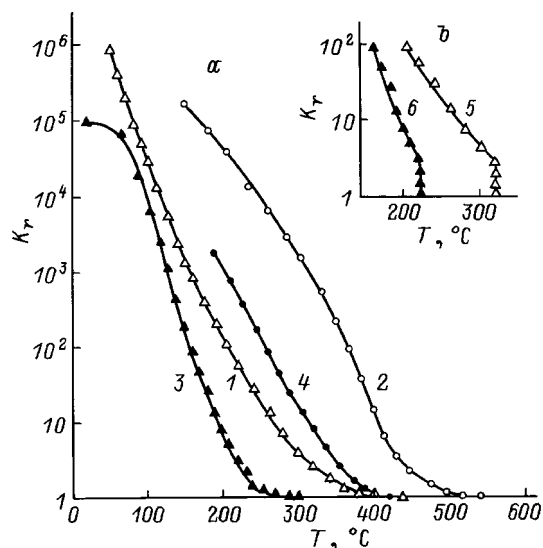


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента выпрямления K_r . *a* — структуры GaAs–Ni (1) и GaP–Au (2), измерения при непрерывном нагревании до температуры, соответствующей переходу в омический контакт T_{ohm} ; для сравнения приведена аналогичная зависимость для структур полупроводник–жидкий металл [3] GaAs–Ga (3) и GaP–In (4). *b* — структуры GaAs–Ni (5) и GaAs–Ga (6), измерения в режиме их выдержки при температуре $T < T_{ohm}$.

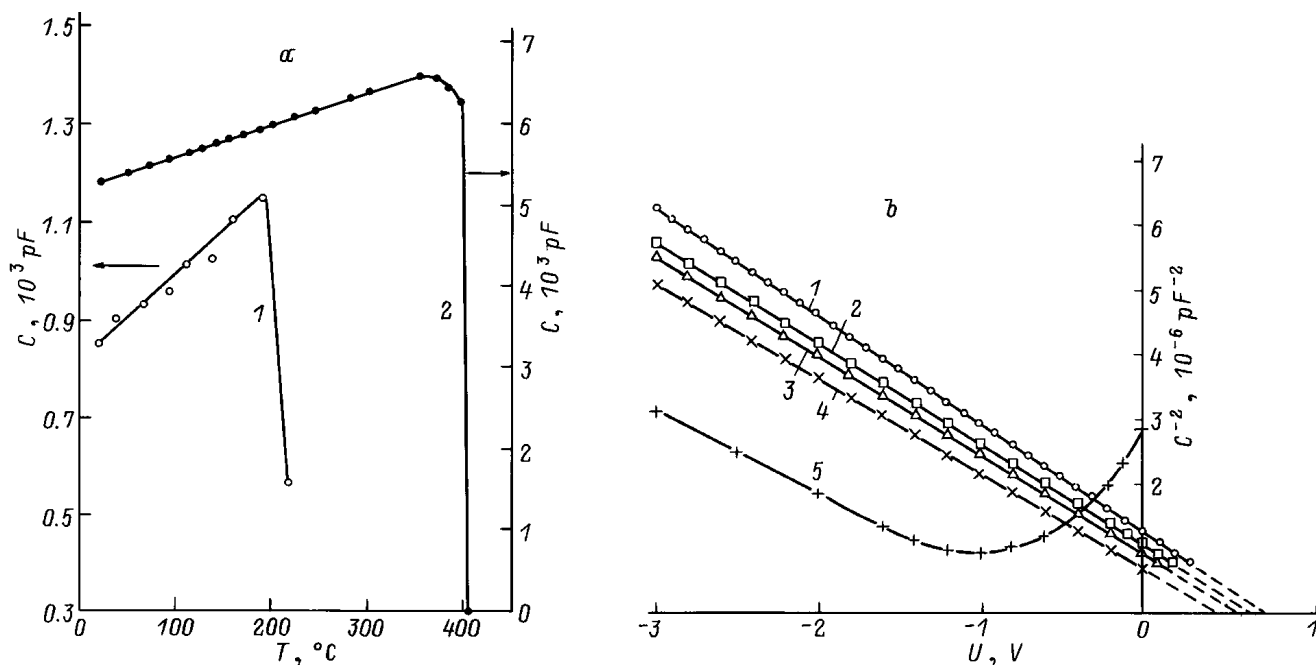


Рис. 2. *a* — температурная зависимость измеряемой мостовым методом емкости C структур GaAs-Ni (1) и GaP-Au (2) при их непрерывном нагревании. *b* — зависимость C^{-2} от U структуры GaAs-Ni при различных температурах T , $^{\circ}\text{C}$: 1 — 20, 2 — 95, 3 — 140, 4 — 195, 5 — 220.

комнатной температуры до 600°C и в процессе этого нагревания измерялись характеристики ток-напряжение ($I-U$) и емкость-напряжение ($C-U$).

Другая часть структур подвергалась ступенчатому нагреву, т.е. отжигалась при различных температурах и после каждого отжига охлаждалась до комнатной температуры, после чего измерялись $I-U$ - и $C-U$ -характеристики.

В качестве параметра, характеризующего асимметрию $I-U$ -характеристики, был взят коэффициент выпрямления $K_r = I_d/I_r$ (отношение прямого и обратного токов) при $U = \pm 0.5\text{В}$.

3. Результаты эволюции $I-U$ - и $C-U$ -характеристик диодов Шоттки GaAs-Ni и GaP-Au при их непрерывном нагревании в интервале температур $20 \div 600^{\circ}\text{C}$ сводятся к следующему.

а) В процессе непрерывного нагревания диоды Шоттки, так же как и контакты полупроводник-жидкий металл, при некоторой температуре переходят от вентильных к омическим (рис. 1, *a*). Такой переход происходит еще до возможного образования сильно легированного или варизонного рекристаллизованного слоя полупроводника, характерного для традиционного омического контакта.

б) Температура перехода вентильных контактов GaAs-Ni в омические (T_{ohm}) составляет $\sim 400^{\circ}\text{C}$, а контактов GaP-Au $\sim 500^{\circ}\text{C}$, что на $\sim 100^{\circ}\text{C}$ превышает температуру перехода для соответствующих контактов полупроводник-жидкий металл. При таких температурах не происходит плавления контактного металла (темпера-

тура плавления составляет $T_m = 1453^{\circ}\text{C}$ для Ni и 1063°C для Au) и поэтому не может происходить растворение полупроводника в жидком металле. Мы предполагаем, что при этих температурах происходит химическое взаимодействие полупроводника с металлом, в результате чего исчезает тонкий приповерхностный слой полупроводника, содержащий большую плотность поверхностных состояний, ответственных за образование вентильных свойств контакта. Отметим, что взаимодействие Au и GaP наблюдалось в [7], причем температура эвтектики материалов составляла 450°C .

в) Измеренная мостовым методом емкость диодов Шоттки GaAs-Ni и GaP-Au (рис. 2, *a*) с ростом температуры T вначале возрастает, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера при увеличении температуры (рис. 2, *b*), достигает максимума, затем начинает уменьшаться и резко падает. Резкое падение измеряемой емкости свидетельствует о сильном уменьшении дифференциального сопротивления структуры, т.е. о начале перехода к омическому контакту (в этом случае емкость, измеряемая мостовым методом, при частотах $0.1 \div 1$ МГц существенно отличается от истинной [8]).

4. В случае ступенчатого нагрева диодов Шоттки GaAs-Ni результаты эволюции $I-U$ -характеристик, измеренных при комнатной температуре, сводятся к следующему (рис. 3).

а) После отжига при температурах T_{ann} , меньшей некоторой температуры $T_0 = 280^{\circ}\text{C}$, $I-U$ -характеристики остаются подобными исходным.

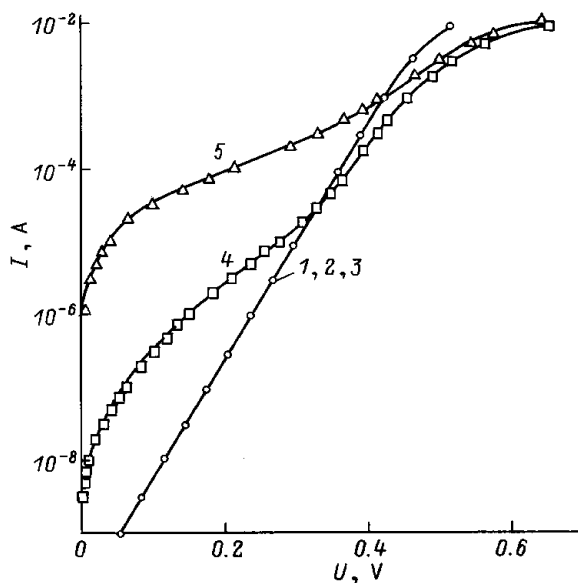


Рис. 3. Зависимости прямого тока I от напряжения U структуры GaAs–Ni при $T = 300$ К непосредственно после изготовления (1) и после отжига при различных температурах T_{ann} , °C: 2 — 210, 3 — 280, 4 — 285, 5 — 290.

б) После отжига при температуре $T_{\text{ohm}} > T_{\text{ann}} > T_0$ на I – U -характеристиках появляются избыточные токи, хотя структуры остаются вентильными. Следует отметить, что достаточно длительная выдержка при этой температуре отжига приводит к переходу вентильного контакта в омический (рис. 1, б).

в) После отжига при температуре $T_{\text{ann}} > T_{\text{ohm}}$ контакт остается омическим и после охлаждения (при этом сопротивление омического контакта было высоким).

5. Итак, контакт полупроводник–металл, исходно вентильный, превращается в омический в процессе нагревания еще до образования рекристаллизованного слоя. При этом происходит химическое взаимодействие металла с приповерхностной областью полупроводника (в случае диодов Шоттки GaAs–Ni и GaP–Au) или растворение этой области в жидком металле, как это происходит в случае нагревания контактов GaAs–Ga или GaP–Ga(In) [3,4].

Из этого факта следует, что вновь образованная поверхность полупроводника приобретает свойства, отличные от свойств исходной поверхности. Можно предположить, что на этой поверхности, контактирующей с металлом, возникают состояния, отличающиеся от исходных и закрепляющие поверхностный уровень Ферми либо в зоне проводимости, либо вблизи ее дна, так что потенциальный барьер для электронов уже не образуется, и контакт становится омическим.

Авторы благодарны Р.В. Хасиевой за помощь при выполнении работы, О.В. Константинову, О.И. Оболенскому и Б.В. Царенкову за обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] E.H. Rhoderick. IEEE Proc., **129**, pt. 1, 1 (1982).
- [2] A.Y.C. Yu. Sol. St. Electron., **13**, 239 (1970).
- [3] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. ФТП, **20**, 1510 (1986).
- [4] Ю.А. Гольдберг, М.В. Ильина, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. ФТП, **22**, 555 (1988).
- [5] Yu.A. Goldberg, E.A. Posse, B.V. Tsarenkov. Electron. Lett., **7**, 601 (1971).
- [6] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков, М.И. Шульга. ФТП, **25**, 439 (1991).
- [7] L. Bernstein. J. Electrochem. Soc., **109**, 270 (1962).
- [8] Ю.А. Гольдберг, О.В. Иванова, Т.В. Львова, Б.В. Царенков. ФТП, **17**, 1068 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

Ohmic contact formation in the process of permanent heating of the GaAs and GaP Schottky diodes

Yu.A. Goldberg, E.A. Posse

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

Abstract Changes in current–voltage and capacity–voltage characteristics of semiconductor–solid metal structures (GaAs–Ni and GaP–Au Schottky diodes) were studied in the course of permanent heating. It was shown that the rectifying contacts pass into ohmic contacts at some temperature T_{ohm} . This transition precedes possible formation of a recrystallized layer that is peculiar to traditional ohmic contact. The transition temperature T_{ohm} was essentially lower than the metal melting point. Current–voltage characteristics of the structures annealed at different temperatures T_{ann} and cooled to room temperature were studied. It has been shown that the structure properties do not change when T_{ann} is less than some critical temperature T_0 , at $T_{\text{ohm}} > T_{\text{ann}} > T_0$ the structures remain rectifying ones but there appear excess currents and at $T_{\text{ann}} > T_{\text{ohm}}$ the structures irreversibly become ohmic. It is assumed that after chemical interaction between the metal and a subsurface layer of the semiconductor, a newly-formed surface acquires properties providing ohmic characteristics of the metal–semiconductor contact.