

Сульфидная пассивация силовых GaAs-диодов

© В.М. Ботнарюк, Ю.В. Жиляев, Е.В. Коненкова

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

(Получена 29 сентября 1998 г. Принята к печати 2 октября 1998 г.)

Исследована возможность уменьшения токов утечки силовых GaAs-диодов при химической обработке их поверхности в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропанол. Установлено, что после химической обработки поверхности величина тока утечки уменьшается как с увеличением времени обработки в растворе (в 8 раз), так и с увеличением времени нахождения диода при приложенном обратном напряжении $U_z = 400 \text{ В}$ (в 2.5 раза).

1. Большая плотность поверхностных состояний GaAs приводит к жесткому закреплению поверхностного уровня Ферми и высокой скорости поверхностной рекомбинации, что приводит к ухудшению ряда параметров приборов.

Как известно, в силовых диодах на основе GaAs $p-n$ -структур общий ток, протекающий через диод при приложении смещения, может быть представлен как [1]

$$I = j_{01}A[e^{qV/kT} - 1] + (j_{02BA} + j_{02PP})[e^{qV/2kT} - 1], \quad (1)$$

где j_{01} и j_{02B} — плотности тока насыщения, связанного с рекомбинацией в квазинейтральной области и области объемного заряда соответственно, A — площадь $p-n$ -перехода, j_{02P} — плотность тока, связанного с рекомбинацией на поверхности $p-n$ -перехода, а P -периметр $p-n$ -перехода.

При приложении обратного смещения ток силовых диодов на основе GaAs при комнатной температуре оценивается поверхностными утечками, которые в значительной степени связаны с высокой плотностью поверхностных состояний по периметру $p-n$ -перехода.

Одним из перспективных методов уменьшения плотности поверхностных состояний GaAs является пассивация поверхности в сульфидосодержащих растворах. Так, например, сообщалось о возможности уменьшения обратных токов GaAs $p-n$ -диодов [1] и InGaAs/AlGaAs лазерных диодов [2] после пассивации в водных растворах сульфида натрия. В последние годы был разработан новый, более эффективный по сравнению с сульфидной пассивацией в водных растворах, метод снижения плотности поверхностных состояний — сульфидная пассивация в растворах спиртов [3], который был применен для увеличения на 50% уровня катастрофической оптической деградации InGaAs/GaAlAs лазерных диодов [4].

Данная работа посвящена исследованию возможности уменьшения тока утечки силовых GaAs-диодов при химической обработке их поверхности в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте ($i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$).

2. Структуры силовых GaAs-диодов выращивались в открытой газотранспортной системе Ga-H₂-AsCl₃ в едином технологическом цикле при температурах источника 820°C и подложки 730 ÷ 750°C. В качестве подложек использовались пластины GaAs толщиной 400 мкм с

концентрацией $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, разориентированные на 3–5° от плоскости (100) в сторону (110), и с плотностью дислокаций $(0.5-1) \times 10^5 \text{ см}^{-2}$. Базовая i -область $p-i-n$ -структуры (n^-) толщиной до $l = 60 \text{ мкм}$ выращивалась без специального легирования с концентрацией носителей заряда $(1-8) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Слой (p^+) $l = 5-15 \text{ мкм}$ выращивался с концентрацией носителей заряда $(1-3) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ путем легирования цинком, вводимым через дополнительный канал в зону роста. Омические контакты изготавливались путем химического испарения никеля на n^+ - и p^+ -стороны структуры (рис. 1). Площадь $p-n$ -перехода силового диода составляла $S \approx 0.1 \text{ см}^2$, а его периметр $P = 1.3 \text{ см}$.

Структуры погружались в раствор $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в $i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ на 1–120 с при комнатной температуре при освещении лампой накаливания 200 Вт и затем высушивались на воздухе. Соотношение объемной концентрации $(\text{NH}_4)_2\text{S} + (i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH})$ был разным: 1:0 (чистый раствор $(\text{NH}_4)_2\text{S}$), 1:10, 1:50 и 1:100.

3. Измерялись вольт-амперные характеристики силовых GaAs-диодов до и после обработки в сульфидосодержащих растворах (рис. 2).

Из сравнения обратной ветви вольт-амперной характеристики следует, что:

обработка как в чистом $(\text{NH}_4)_2\text{S}$, так и в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте приводит к уменьшению токов утечки, при этом следует отметить, что

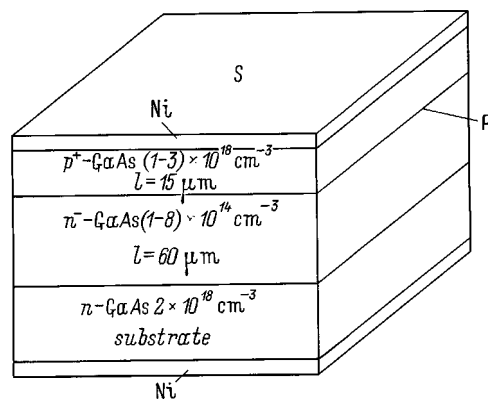


Рис. 1. Схематическое изображение GaAs $p-n$ -структуры.

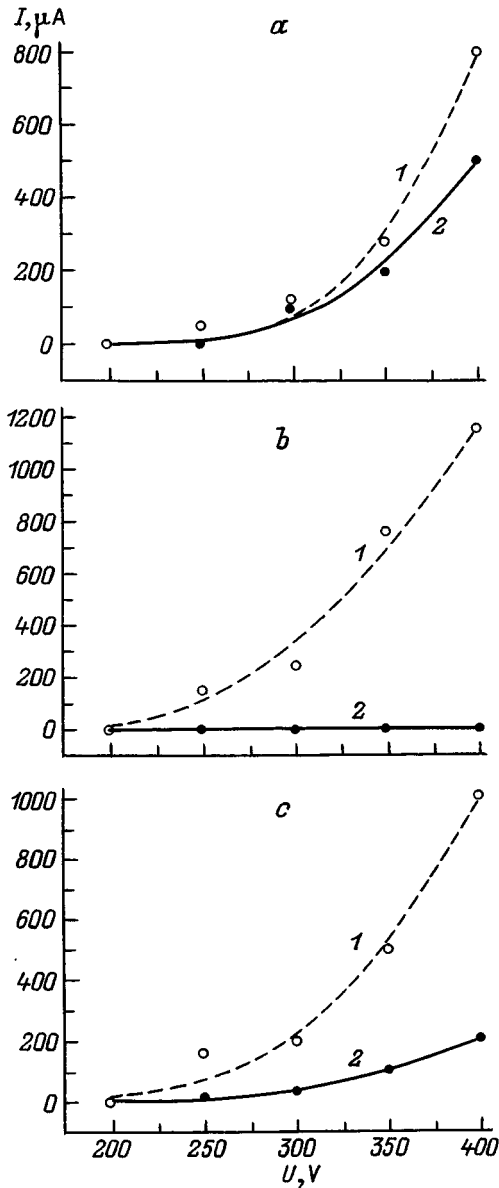


Рис. 2. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики силовых GaAs-диодов, необработанных (1) и обработанных (2) в трех растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте с различной концентрацией: *a* — чистый раствор сульфида аммония, *b* — 1:10, *c* — 1:1000.

наибольшее уменьшение токов утечки (в 100 раз при $U = 400$ В) было достигнуто в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ с соотношением объемных концентраций 1:10 (рис. 2); оптимальное время обработки силовых GaAs-диодов составляет около 1 мин. Действительно, при обработке в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ 1:50 уменьшение тока утечки при выдержке 30 с было в 2 раза, 1 мин — в 8 раз, а при дальнейшей выдержке в растворе ≈ 2 мин уменьшение тока утечки было незначительным (рис. 3); уменьшение тока утечки зависит от времени последующего нахождения GaAs-диода под приложенным обрат-

ном напряжении 400 В: с увеличением времени выдержки по крайней мере до 15 мин происходит уменьшение токов утечки диода (рис. 4) более чем в 2 раза.

Отметим, что вольт-амперные характеристики, снятые повторно через несколько дней выдержки на воздухе без приложенного напряжения, практически не отличались от характеристик, снятых через 15 мин после приложения обратного напряжения.

4. Уменьшение токов утечки GaAs p - n -структур связано, по-видимому, с изменением плотности поверхностных состояний за счет формирования сульфидного пассивирующего покрытия на поверхности GaAs.

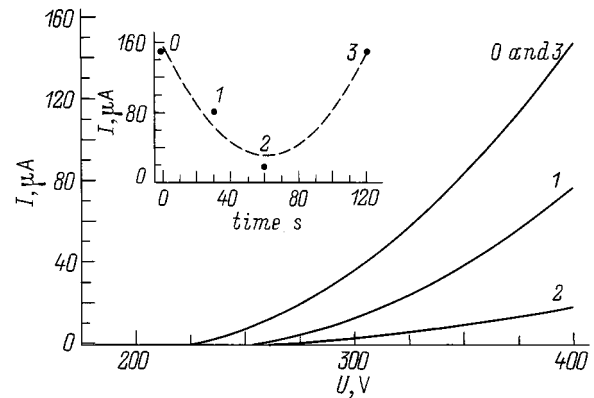


Рис. 3. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики силовых GaAs-диодов, необработанных (0) и обработанных (1, 2, 3) в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ (1:50) при различных временах обработки, с: 1 — 30, 2 — 60, 3 — 120. На вставке — зависимость максимального тока утечки диода при напряжении 400 В от времени обработки.

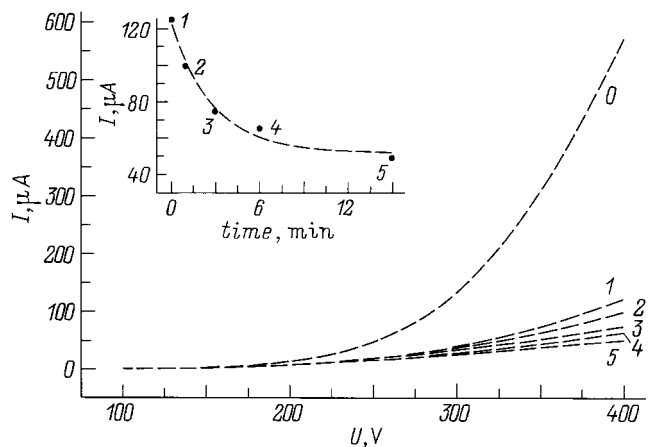


Рис. 4. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики силовых GaAs-диодов, необработанных (0) и обработанных (1–5) в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + i\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ (1:50) при разных временах нахождения диода под приложенным обратным напряжением 400 В, мин: 1 — 0,1, 2 — 1, 3 — 3, 4 — 6, 5 — 15. На вставке — зависимость максимального тока утечки диода от времени нахождения диода под приложенным обратным напряжением 400 В.

Предэкспоненциальный множитель для рекомбинационного тока в (1)

$$I_{02} = A j_{02B} + P j_{02P} \quad (2)$$

содержит компоненту тока, связанного с поверхностью. Можно предположить, что снижение тока утечки является следствием значительной перестройки спектра поверхностных состояний.

Результаты влияния химической обработки в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте на ток утечки силовых GaAs-диодов находятся в согласии с моделью сульфидной пассивации поверхности GaAs в растворах спиртов [5] и результатами кинетики формирования сульфидного покрытия в водных растворах сульфида натрия [6].

Согласно этой модели, скорость образования сульфидного покрытия определяется как скоростью выхода электронов из полупроводника в раствор при окислении полупроводника, так и скоростью разрыва приповерхностных химических связей полупроводника, а также скоростью образования связей с поверхностными атомами полупроводника. Повышение эффективности пассивации, а следовательно, и более существенное уменьшение тока утечки диодов будет достигаться при увеличении скорости химической реакции [5], которая, во-первых, выше в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте, чем в чистом $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ [5], и, во-вторых, уменьшается при уменьшении концентрации сульфид-ионов в растворе спирта (рис. 2).

Оптимальное время химической обработки около 1 мин коррелирует с результатом фотOLUMИНЕСЦЕНТНЫХ исследований GaAs, пассивированного в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в спиртах [5]. Дальнейшее увеличение времени обработки до 2 мин приводит к снижению эффекта уменьшения токов утечки и, по-видимому, связано с возникновением из продуктов химической реакции существенных шунтирующих каналов на поверхности $p-n$ -структуры.

Дальнейшее уменьшение токов утечки под воздействием приложенного обратного напряжения (рис. 4), вероятно, связано с тем, что в этом случае происходит дальнейшая модификация поверхности GaAs под воздействием повышения температуры диода при приложении обратного напряжения, с образованием более энергетически выгодной поверхностной структуры, аналогично тому, как это происходит после пассивации в водных сульфидных растворах под воздействием света [7].

Таким образом, с помощью химической обработки в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ в изопропиловом спирте поверхности $p-n$ силовых GaAs-диодов можно значительно уменьшить токи утечки через поверхность.

С увеличением времени обработки в растворе до 1 мин и с увеличением времени нахождения диода при обратном смещении в $U = 400$ В эффективность снижения токов утечки увеличивается.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.Н. Бессолова за стимулирование этой работы.

Список литературы

- [1] M.S. Carpenter, M.R. Melloch, M.S. Lundstrom, S.P. Tobin. Appl. Phys. Lett., **52** (25), 2157 (1988).
- [2] G. Beister, J. Maege, D. Gutsche, G. Erbert, J. Sebastian, K. Vogel, M. Weyers, J. Würfl, O.P. Daga. Appl. Phys. Lett., **68** (18), 2467 (1996).
- [3] V.N. Bessolov, E.V. Konenkova, M.V. Lebedev. Mater. Sci.&Engin. B, **44**, 376 (1997).
- [4] V.N. Bessolov, M.V. Lebedev, B.V. Tsarenkov, Yu.M. Shernyakov. Mater. Sci.&Engin. B, **44**, 380 (1997).
- [5] В.Н. Бессолов, Е.В. Коненкова, М.В. Лебедев. ФТТ, **39**, 63 (1997).
- [6] В.Н. Бессолов, А.Ф. Иванков, Е.В. Коненкова, М.В. Лебедев, В.С. Стрыканов. ФТП, **30**, 364 (1996).
- [7] V.L. Berkovits, A.O. Gusev, V.M. Lantratov, T.V. L'vova, D. Paget, A.B. Pushnyi, V.P. Ulin. Phys. Low-Dim. Structur., **12**, 293 (1995).

Редактор В.В. Чалдышев

Sulfur passivation of GaAs power diodes

V.M. Botnaruk, Yu.V. Zhilyaev, E.V. Konenkova

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

Abstract It has been shown that the chemical treatment in the solutions of $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ in isopropanol results in the decrease of the dark current of GaAs power diodes. The dark current decreases with the increase of time of the diode exposure to the treatment in the solutions and with the increase of the time of operation of the diodes at the reverse bias in (400 V).