

Характеристики арсенидгаллиевых структур и приборов Ганна на их основе, изготовленных с применением радиационно-термической технологии

© М.В. Ардышев[✉], В.М. Ардышев

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете, 634050 Томск, Россия

(Получена 5 августа 2002 г. Принята к печати 6 сентября 2002 г.)

Ионно-легированные слои создавали имплантацией ионов серы в монокристаллический GaAs, а также в эпитаксиальные пленки GaAs на полупроводящих подложках с последующим термическим отжигом. Дополнительную радиационную обработку проводили с помощью галогенных ламп (фотонный отжиг). По планарной технологии изготавливали приборы Ганна и интегральные схемы на их основе. Показано, что дополнительная обработка приводит к росту подвижности электронов в слоях за счет снижения концентрации центров рассеяния. Структуры приборов Ганна, подвергнутые фотонному отжигу, характеризуются лучшей однородностью и более высоким значением перепада тока. Слои генерируют близкие к идеальным импульсы тока; отсутствуют эффекты, связанные с захватом на ловушки, а также ударная ионизация.

1. Введение

Известно, что приборы Ганна предъявляют наиболее жесткие требования к чистоте, однородности и структурному совершенству материала, из которого они изготавливаются [1]. Для обеспечения высокого быстродействия, хорошей когерентности колебаний и высокой чувствительности по управляющему электроду эти требования сводятся к следующим [2]: концентрация электронов в рабочем слое $n \cong (2-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина слоя $d \geq 0.5 \text{ мкм}$, произведение $n \cdot d \cong 10^{12} \text{ см}^{-2}$, подвижность электронов $\mu \geq 5000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ (при 300 К). Получение ионно-легированных слоев (ИЛС) с высокой подвижностью, близкой к теоретическим значениям, представляет сложную задачу, если учесть, что при имплантации структура GaAs значительно повреждается.

В этой связи цель работы состояла в исследовании радиационно-термической модификации GaAs для создания структур и планарных приборов Ганна высокого качества.

2. Методика экспериментов

Исследования выполнены на пластинах монокристаллического GaAs (удельное сопротивление более $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, плотность дислокаций не выше $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, подвижность электронов $3000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, ориентация (100)), а также на эпитаксиальных пленках нелегированного GaAs, выращенных по хлоридной технологии на полупроводящих подложках. Концентрация фоновой примеси в пленках не превышала 10^{14} см^{-3} , подвижность электронов была не ниже $6300 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, толщина на 1.5–8.0 мкм.

Перед имплантацией пластины обрабатывали в травителе $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 100$. Имплантацию ионов серы (^{32}S) выполняли с энергией 100 кэВ дозой $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при температуре 150°C . Затем наносили

диэлектрик SiO_2 по способу [3] из пленкообразующего раствора с концентрацией самария 6–8 вес%. Термический отжиг осуществляли при температурах $750-850^\circ\text{C}$ в течение 1.5 ч. Радиационную обработку структур проводили в установке „Импульс-5“ (с использованием галогенных ламп) при температурах $520-800^\circ\text{C}$ в течение 10–30 с в атмосфере азота (точка росы не выше -65°C).

После отжига и удаления диэлектрика выполняли измерения слоевой концентрации и подвижности электронов методом Ван-дер-Пау в сочетании с послойным травлением в диапазоне температур 70–400 К.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости подвижности электронов μ в ИЛС от толщины d эпитаксиальных пленок, в которых они сформированы. Видно, что с уменьшением

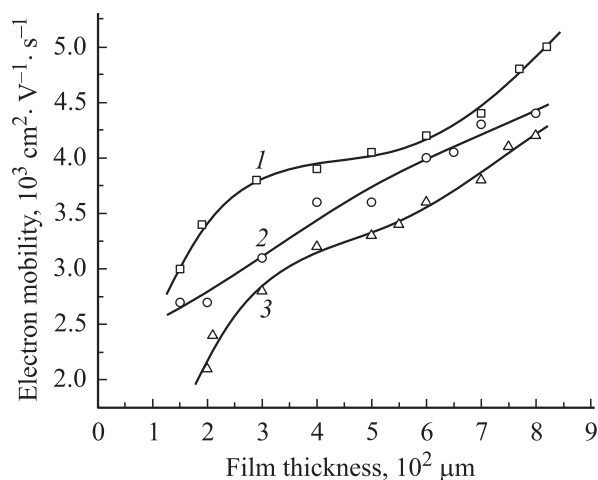


Рис. 1. Подвижность электронов μ при 300 К в ИЛС, изготовленных в эпитаксиальных пленках нелегированного арсенида галлия различной толщины при температурах отжига T_{ann} , $^\circ\text{C}$: 1 — 750, 2 — 800, 3 — 850.

[✉] E-mail: ard.rff@elefot.tsu.ru, detector@mail.tomsknet.ru

Таблица 1. Параметры ИЛС, изготовленных в эпитаксиальных пленках различной толщины при температуре 750°C в течение 1.5 ч

№ п/п	Толщина пленки, мкм	n_i , см ⁻³	N_{dip} , см ⁻³	N_{Weis} , см ⁻³	N_S , см ⁻³	K	μ (300 К), см ² В ⁻¹ с ⁻¹
1	Монокристалл	$2.5 \cdot 10^{17}$	$\sim 7 \cdot 10^{16}$	$1.8 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	0.85	3160
2	2	$2.0 \cdot 10^{17}$	—	$1.4 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{12}$	0.70	3470
3	4	$1.6 \cdot 10^{17}$	—	$1.0 \cdot 10^{15}$	$2.9 \cdot 10^{12}$	0.54	3930
4	8	$1.2 \cdot 10^{17}$	—	$4.5 \cdot 10^{14}$	$3.8 \cdot 10^{12}$	0.38	4380
5*	8	$1.1 \cdot 10^{17}$	—	$1.1 \cdot 10^{14}$	$4.2 \cdot 10^{12}$	0.27	5060

Примечание. * — дополнительная радиационная обработка.

ем d уменьшаются значения μ , приближаясь к значениям, характерным для слиточного компенсированного полупроводящего GaAs. Причем с ростом температуры термического отжига величина $\mu \cong 3000 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ наблюдается при больших толщинах эпитаксиальных пленок. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при малых толщинах эпитаксиальных пленок в них появляются дополнительные центры рассеяния электронов по сравнению с толстыми пленками. Наиболее вероятной причиной их появления является диффузия дефектов — центров рассеяния из подложки в эпитаксиальную пленку при их нанесении и последующем термическом отжиге. Так как с ростом температуры отжига глубина диффузии дефектов увеличивается, для уменьшения их влияния на подвижность электронов в ИЛС требуется обеспечить большую толщину пленки между ИЛС и подложкой.

Установлено [4], что для получения $\mu > 4500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ в ИЛС, формируемых в эпитаксиальных пленках, толщина последних должна удовлетворять соотношению $d \geq 10 \cdot (D_S t)^{1/2}$, где D_S — коэффициент диффузии серы при температуре отжига из слоя внедрения, t — время отжига. Это соотношение получено при условии, что глубина диффузии серы не достигает границы пленка-подложка. Причем ИЛС должен располагаться в слое, где присутствие примесей и дефектов, диффундирующих из подложки в пленку, будет минимальным. В соответствии с приведенным соотношением для выбранных режимов отжига $D_S \approx 10^{-12} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ [5,6], и толщина пленки должна составлять не менее 7.3 мкм. В этом случае подвижность электронов в ИЛС будет не менее $4550 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, что подтверждается данными рис. 1 (кривая 1).

Для выяснения типа дополнительных центров рассеяния в ИЛС были выполнены температурные измерения подвижности, представленные на рис. 2. Экспериментальные зависимости оптимизировали методом поиска глобального экстремума расчетными зависимостями, в которых использовали известные аналитические выражения для рассеяния на дополнительных центрах (диполи [7], нейтральные примеси [8], области объемного заряда [9], двумерные [10] и одномерные [11] дефекты).

В табл. 1 приведены концентрации дополнительных центров рассеяния, которые обеспечивают наилучшее

совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Здесь также представлены значения подвижности электронов при 300 К, слоевой концентрации и степени компенсации.

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что увеличение μ в ИЛС с ростом толщины эпитаксиальных пленок достигается уменьшением концентраций точечных дефектов N_i , диполей N_{dip} и неоднородностей Вайсберга N_{Weis} . Последний тип дефектов обусловлен, вероятно, дефектно-примесными комплексами, в образовании которых принимают участие дефекты подложки, так как с увеличением толщины пленок концентрация N_{Weis} уменьшается. Уменьшаются также концентрация N_i , степень компенсации K , а слоевая концентрация N_S увеличивается. Обращает на себя внимание тот факт, что радиационная обработка ИЛС, сформированного в пленке толщиной 8 мкм, приводит к дополнительному увеличению подвижности электронов, уменьшению концентрации неоднородностей Вайсберга и увеличению слоевой концентрации. При этом концентрация точечных дефектов практически не меняется. Можно предположить, что радиационно-термический процесс,

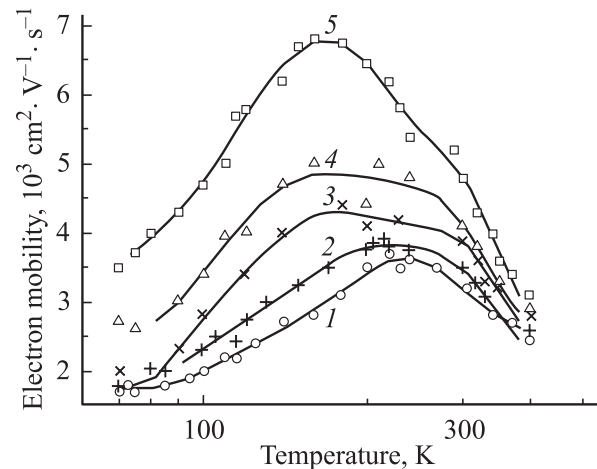


Рис. 2. Температурные зависимости подвижности электронов в ИЛС, сформированных при $T_{ann} = 750^\circ\text{C}$ в течение $t = 1.5$ ч в монокристаллическом GaAs (кривая 1), в эпитаксиальных пленках нелегированного GaAs толщиной d , мкм: 2 — 2, 3 — 4, 4 и 5 — 8. 5 — после дополнительной радиационной обработки.

протекающий при дополнительной обработке, приводит к распаду дефектно-примесных комплексов, в результате чего увеличиваются концентрация электронов и их подвижность, уменьшается степень компенсации, т.е. структура ИЛС становится более совершенной.

В работах [12–16] показано, что радиационно-термическая обработка имплантированного GaAs (быстрый термический отжиг с помощью галогенных ламп, электронный отжиг) приводит как к ускорению процессов диффузии примеси и ее электрической активации, так и к образованию комплексов дефектов. С учетом результатов данной работы можно говорить о том, что при радиационной обработке протекают также процессы распада комплексов дефектов. Пока не ясно, действие каких факторов обеспечивает доминирование того или иного из указанных процессов.

На рис. 3 представлены типичные профили концентрации и подвижности электронов в ИЛС, предназначенных для приборов Ганна. Величина холловской подвижности была не меньше $4600 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. В изготовленных об-

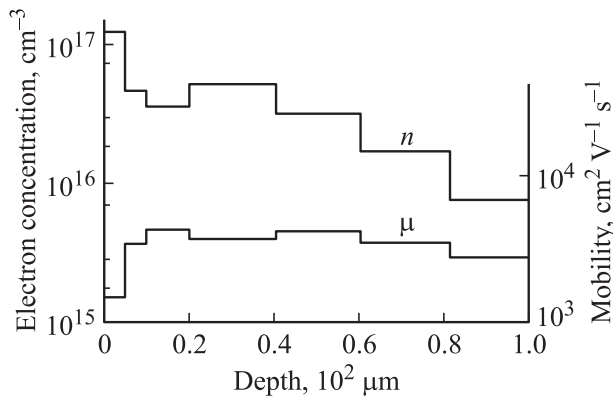


Рис. 3. Профиль распределения концентрации и подвижности электронов в приборной структуре GaAs.

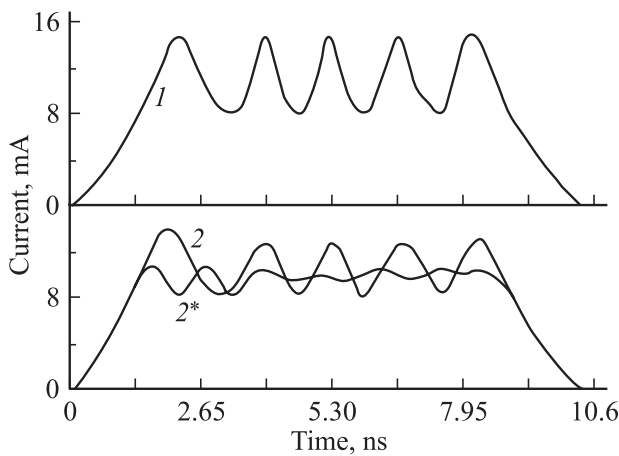


Рис. 4. Осциллограммы токов диодов Ганна, изготовленных в эпитаксиальных пленках и прошедших (1) и не прошедших дополнительную радиационную обработку без подсветки (2) и с подсветкой (2*).

Таблица 2. Параметры приборов Ганна

Материал	$\Delta R/R, \%$	$\gamma, \%$
Структура до радиационной обработки	13.9	36.4
Структура после радиационной обработки	8.7	43.6

разцах произведение $n \cdot d = (1-4) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, а толщина легированного слоя 0.60–0.95 мкм.

Экспериментальные приборы Ганна и интегральные схемы (ИС) на их основе изготавливали по планарной технологии. Омические контакты получали путем напыления в вакууме сплава AuGe + 14%Ni и последующего вжигания в атмосфере водорода при температуре 420°C в течение 2–5 мин. Выделение активных элементов ИС осуществляли последовательной бомбардировкой межэлементных промежутков ионами водорода, гелия и азота. Образцы приборов Ганна имели длину 100 мкм и ширину 50 мкм. Измерение проводили с использованием стробоскопического осциллографа типа 5009. На рис. 4 представлены осциллограммы тока диодов, изготовленных из двух типов структур с ионно-легированными слоями: прошедших и не прошедших дополнительную радиационную обработку. Основные параметры диодов (однородность сопротивления $\Delta R/R$ и перепад тока γ) приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2 и рис. 4, ИЛС в эпитаксиальных пленках, прошедших радиационную обработку фотонами, характеризуется лучшей однородностью и более высоким значением перепада тока. Эти слои генерировали близкие к идеальным импульсы тока, причем эффекты, связанные с захватом на ловушки и эффектами ударной ионизации, полностью отсутствовали. В то же время эти эффекты присутствуют в диодах, изготовленных из материала второго типа.

По описанной выше технологии были изготовлены ИС регенераторов на GaAs с планарными приборами Ганна. Параметры полученных регенераторов были следующими: величина управляющего сигнала 0.3 В, выходной сигнал 0.3 В (при нагрузке 50 Ом), длительность импульса 300 пс, длительность фронта импульса 80 пс, потребляемая мощность 0.19 Вт. Регенераторы обеспечивали производство потребляемой мощности на быстродействие вблизи 10 пДж.

Авторы выражают благодарность Г.И. Айзенштату за помощь в проведении измерений характеристик приборов Ганна и интегральных схем.

Список литературы

- [1] Дж. Кинг, М.П. Вассе, С.П. Сэндбэнк. В сб.: *Арсенид галлия* (М., Сов. радио, 1972) с. 224.
- [2] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).

- [3] В.М. Ардышев, Л.А. Козлова, О.Н. Коротченко, А.П. Мамонтов. А. с. № 235899 от 01.04.86.
- [4] В.М. Ардышев, Г.И. Айзенштат, Б.С. Азиков, Л.С. Широков. А. с. № 125682 от 03.03.80.
- [5] Т.Т. Лавришев, С.С. Хлудков. В сб.: *Арсенид галлия* (Томск, Изд-во ТГУ, 1974) вып. 5, с. 57.
- [6] Д. Шоу. *Атомная диффузия в полупроводниках* (М., Мир, 1975) гл. 6, с. 406. [Пер. с англ.: *Atomic Diffusion in Semiconductors*, ed. by D. Shaw (London–N.Y., Plenum Press, 1973)].
- [7] R. Stratton. *J. Phys. Chem. Soc.*, **23**, 1011 (1962).
- [8] L.M. Falicot, M. Cuevas. *Phys. Rev.*, **164**, 1025 (1967).
- [9] L.R. Weisberg. *J. Appl. Phys.*, **33**, 1817 (1962).
- [10] К.Л. Чопра. *Электрические явления в тонких пленках* (М., Мир, 1972) гл. 1, с. 97.
- [11] В.Л. Бонч-Бруевич, С.М. Коган. *ФТТ*, **1**, 1221 (1959).
- [12] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. *ФТП*, **32**, 1153 (1998).
- [13] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев, С.С. Хлудков. *ФТП*, **34**, 28 (2000).
- [14] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев, С.С. Хлудков. *ФТП*, **34**, 70 (2000).
- [15] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. *ФТП*, **36**, 164 (2002).
- [16] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. *ФТП*, **36**, 269 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

Characteristics of gallium arsenide structures and Gunn devices on their basis fabricated with the use of a radiation-thermal technology

M.V. Ardyshev, V.M. Ardyshev

Kuznetsov Siberian Physicotechnical Institute hosted
by Tomsk State University
634050 Tomsk, Russia

Abstract Ion-doped layers were formed by implantation of sulphur ions into GaAs single crystal as well as into epitaxial films grown on semi-insulating substrates with the subsequent thermal annealing. Additional radiation treatment was carried out with the use of halogen lamps (photon annealing). Gunn devices and integrated circuits were fabricated by planar technology. The additional treatment is shown to result in the growth of the electron mobility because of decreasing the scattering center density. Structures of Gunn devices subjected to the photon annealing are characterized by better homogeneity and higher value of the current overfall. The layers generate current pulses that are close to ideal ones, effects bound with capture on traps as well as the collision ionization were absent.