

К. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ, д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ,
Д. В. ЛУКОМСКИЙ, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ

Украина, Одесская нац. морская академия,
Одесский нац. политехнический университет;
г. Киев, Нац. авиационный университет
E-mail: vadim@vag.intas.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
13.02 — 31.07 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ
(КБКП, г. Баку)

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ АРСЕНИД ГАЛЛИЯ

Показана возможность управления электрофизическими параметрами эпитаксиальных слоев арсенида галлия с помощью радиационной обработки быстрыми нейтронами.

Явление радиоактивности со времени его открытия интенсивно используется учеными для исследований свойств материалов [1]. В течение последних нескольких десятилетий внимание исследователей привлекла также возможность использования радиоактивности в технологических целях [1, 2], достаточно успешно решались технические и экономические проблемы использования радиационной технологии в полупроводниковой промышленности Украины и России [1—5].

В настоящей работе проведен анализ возможностей воздействия радиационного облучения быстрыми нейтронами на свойства эпитаксиальных слоев (ЭС) арсенида галлия с целью радиационного управления электрофизическими свойствами ЭС GaAs.

Облучению нейтронами подвергались нелегированные эпитаксиальные слои арсенида галлия с остаточной концентрацией активных примесей $(1...10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а также легированные цинком и теллуrom (см. таблицу).

Источником быстрых нейтронов с энергией 14,5 МэВ служил генератор нейтронов типа НГ-150. Поток нейтронов измерялся методом активации фольги – диска из высокочистой меди (99,9%) толщиной 0,25 мм и диаметром 10–25 мм. Время облучения — 1 мин, выдержка образцов после облучения — 1 мин. Гамма-активность радиоизотопа ^{62}Cu измеряли сцинтиляционным детектором с кристаллом NaI(Fe) диаметром 75 мм на расстоянии 30 мм от центра. Медный диск помещался между двумя пластинками из полистирола толщиной 9,5 мм и диаметром 30—45 мм. В качестве анализирующей аппаратуры использовался многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024.

Расчет величины интегрального потока нейтронов производился по формуле [6]

$$\Phi_0 = \frac{S_p}{E a q p}, \quad (1)$$

где S_p — площадь фотопика;

E — эффективность регистрации для геометрии "источник—детектор";

a — поправка на поглощение в полистироле и кожухе детектора;

q — выход гамма-квантов на акт распада изотопа ^{62}Cu ;

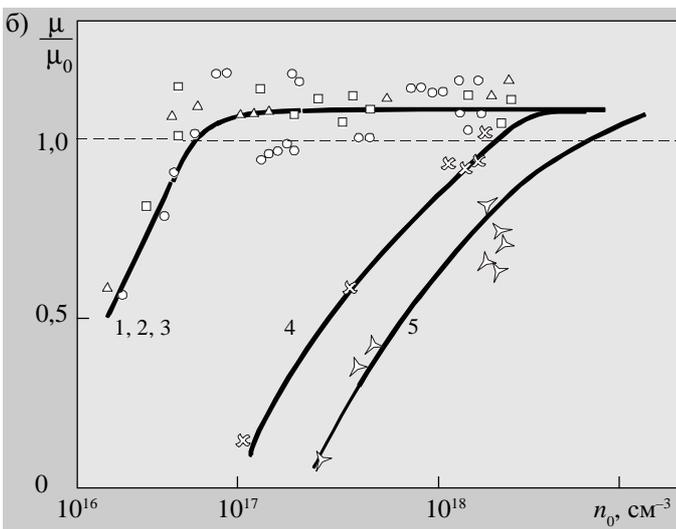
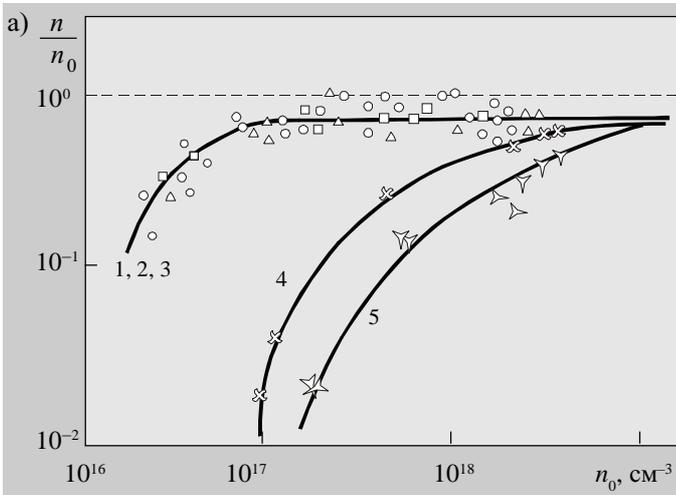
p — экспериментальная эффективность фотопика.

*Изменение электрофизических параметров арсенида галлия, облученного нейтронами
(для дозы облучения $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$)*

Удельное сопротивление, Ом·см			Концентрация носителей, см^{-3}			Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$		
До облучения	После облучения	Относительное изменение, %	До облучения	После облучения	Относительное изменение, %	До облучения	После облучения	Относительное изменение, %
Подложки								
0,01888	0,01895	+0,4	$1,39 \cdot 10^{17}$	$1,35 \cdot 10^{17}$	-17,3	2380	2880	+21,0
0,01632	0,01638	+0,4	$1,53 \cdot 10^{17}$	$1,26 \cdot 10^{17}$	-17,7	2498	3029	+21,3
Нелегированные эпитаксиальные слои								
0,06176	0,36151	+485,3	$1,86 \cdot 10^{16}$	$4,8 \cdot 10^{15}$	-74,1	5430	3591	-33,86
0,05840	0,51560	+782,8	$2,39 \cdot 10^{16}$	$4,40 \cdot 10^{15}$	-81,59	4475	2770	-38,10
Эпитаксиальные слои, легированные теллуrom								
0,00563	0,00639	+13,44	$3,70 \cdot 10^{17}$	$3,04 \cdot 10^{17}$	-17,80	2996	3207	+7,04
0,00520	0,00517	-0,70	$6,86 \cdot 10^{17}$	$5,76 \cdot 10^{17}$	-16,00	1751	2100	+19,9
Эпитаксиальные слои, легированные цинком								
0,00191	0,00199	+4,81	$1,45 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	-17,24	2261	2595	+14,80
0,05690	0,05550	-2,50	$1,05 \cdot 10^{18}$	$8,63 \cdot 10^{17}$	-17,8	104	130	+25,1

Значения основных параметров слоев до и после облучения дозами $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ нейтронов приведены в таблице. После облучения более высокими дозами нейтронов удельное сопротивление слоев в отдельных случаях возрастало настолько, что его невозможно было измерить методом Ван-дер-Пау.

Анализ полученных данных показывает, что при малых дозах облучения (до 10^{15} см^{-2}) и высокой начальной концентрации свободных носителей заряда в слоях их электрофизические характеристики изменяются: уменьшается концентрация и возрастает подвижность носителей заряда. При этом степень их изменения не зависит от типа легирующей примеси. При больших дозах облучения наблюдается компенсация материала слоя радиационными дефектами. Это проявляется в уменьшении концентрации носителей заряда и их подвижности и возрастании величины удельного сопротивления слоя. Изменение параметров слоя здесь также не зависит от типа легирующей примеси.



Зависимость относительного изменения концентрации (а) и подвижности (б) от начальной концентрации носителей заряда в арсениде галлия при различных дозах облучения нейтронами: \circ — $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; \square — $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; \triangle — $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; \otimes — $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; ∇ — $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Эти особенности хорошо видны на графиках зависимости относительного изменения в слое концентрации и подвижности от начального значения концентрации носителей заряда и дозы облучения нейтронами (см. рисунок), где n_0 , n — концентрация но-

сителей заряда, μ_0 , μ — подвижность — до и после облучения, соответственно. При дозах облучения $(1 \dots 10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ изменение параметров зависит только от начальной концентрации носителей заряда и не зависит от дозы облучения (кривые 1, 2, 3). При $n_0 > 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ здесь наблюдается улучшение параметров эпитаксиального слоя независимо от типа и концентрации легирующей примеси. При дозах облучения, больших $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, наблюдаются значительные изменения параметров, зависящие от дозы облучения и не зависящие от типа легирующей примеси.

Анализ изменения концентрации носителей заряда от дозы облучения нейтронами показывает, что ее уменьшение, подобное результатам, полученным в работе [7, с. 44], наблюдается в нашей работе при начальной концентрации активных примесей в них

$$n_0 \leq (50 \dots 250) \Phi_{\text{П}}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{П}}$ — доза облучения нейтронами.

При этом меньшим дозам соответствует большее значение числового коэффициента.

Стойкость слоев к облучению нейтронами зависит в значительной степени от дозы облучения. Облучение дозами нейтронов больше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ вызывает большие изменения электрофизических свойств слоев.

Оценим в этих условиях темп компенсации носителей заряда радиационными дефектами. Считаем, что процесс выведения носителей заряда протекает по экспоненциальному закону:

$$n = n_0 \cdot \exp(-K_n \Phi_{\text{П}}), \quad (3)$$

где K_n — коэффициент, характеризующий скорость выведения носителей заряда.

При облучении дозами нейтронов $(1 \dots 100) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и начальной концентрации свободных носителей заряда в пределах $(2 \dots 200) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ оказалось, что величина K_n зависит не только от начальной концентрации носителей в эпитаксиальном слое, но и от дозы облучения. Следует отметить, что такая зависимость носит сложный характер. Это позволяет предположить существование, по крайней мере, двух различных по своей природе механизмов воздействия нейтронного облучения на свойства эпитаксиальных слоев арсенида галлия.

Таким образом, влияние облучения нейтронами на электрофизические параметры эпитаксиальных слоев арсенида галлия приводит к следующим результатам.

1. Влияние нейтронов на электрофизические параметры эпитаксиальных слоев арсенида галлия характеризуется существованием некоторого порога в значениях дозы облучения: до нее облучение не влияет или улучшает свойства слоев, а после нее их параметры ухудшаются. По этому признаку такую дозу можно условно считать порогом стойкости свойств слоев к облучению нейтронами.

2. Положение обнаруженного порога на кривых взаимной зависимости параметров n_0 , μ_0 , Φ определяется сочетанием их значений. При этом выделяются два основных случая. Первый определяется сочетанием $n \geq (50 \dots 250) \Phi_{\text{П}}$. В этом случае облучение

улучшает свойства слоев. Подобный эффект устойчив к отжигу до 200—300°C. Второй случай проявляется для $n \leq (50 \dots 250) \Phi_{\Gamma}$. Здесь результатом облучения является компенсация слоя радиационными дефектами вплоть до полуизолирующего состояния. Такой эффект сохраняет термическую устойчивость до значений температуры 550—600°C.

3. Предположительно первый случай может быть вызван переходом собственных атомов кристаллической решетки слоя из междоузельного в регулярное положение под действием нейтронов. Улучшение структуры при этом изменяет условия рассеивания и генерации носителей заряда. Кроме того, здесь велика вероятность образования кластеров типа «радиационный дефект — примесь — вакансия», способствующих стоку свободных носителей заряда. Второй случай может быть обусловлен созданием при больших дозах облучения радиационных дефектов, выступающих в роли глубоких акцепторных примесей. Это объясняет сильную компенсацию слоев и термическую устойчивость такого эффекта.

4. Воздействие облучения не зависит от типа легирующей примеси и протяженности слоя (подложка или эпитаксиальный слой).

5. В технологическом аспекте облучение нейтронами как средство управления свойствами эпитаксиальных слоев арсенида галлия следует разделить на два вида в зависимости от дозы облучения. Первый вид — малые дозы облучения до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Он может служить средством улучшения свойств слоев (повышения подвижности носителей заряда и увеличения быстродействия) и проявляется наиболее эффективно для слоев с начальной концентрацией свободных носителей заряда более $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Вторым

вид — дозы облучения более $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Основным эффектом его воздействия — уменьшение концентрации и подвижности носителей заряда. Для повышения стойкости к данному виду облучения следует легировать слои GaAs до концентрации легирующей примеси не менее $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Костенко С. П. Механизмы управляемого структурообразования поверхностей слоев Pd–Ag при облучении α -частицами // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 1998.— № 2.— С. 36—39.

2. Костенко С. П. Тенденции в материаловедении как перспектива появления новых электронных компонентов // Там же.— 1999.— № 2—3.— С. 37—43.

3. Chernov I., Mamontov A. Ordering of defective crystal structure by ionizing radiation (effect of small doses of radiation) // Program of the MRS 1998 Spring Meeting.— San-Francisco, CA.— 1998.— P. 51.

4. А. с. 1618213 СССР. Способ формирования поверхностных полупроводниковых структур / В. Л. Августин, Д. И. Бидный, С. П. Костенко и др.— 01.09 1990.

5. Конакова Р. В., Тхорик Ю. А., Хазан Л. С. Возможности радиационной технологии в производстве диодов // *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*.— 1988.— № 2.— С. 47—56.

6. Мокрицкий В. А., Завадский В. А. Влияние радиационной обработки на параметры интегральных преобразователей температуры // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2001.— № 1.— С. 25—27.

7. Belyaev A. E., Breza J., Venger E. F. et al. Radiation resistance of GaAs-based microwave Schottky-barrier devices. Some physico-technological aspects.— Киев.: ИНТЕРПРЕС ЛТД, 1998.

Редакция журнала

"Технология и конструирование в электронной аппаратуре"

ПРОСИТ ПОИНТЕРЕСОВАТЬСЯ,

подписана ли Ваша организация на журнал "ТКЭА" на 2003 год (индекс в подписных каталогах — **71141**, периодичность — 6 номеров в год). Подписку можно оформить не только в почтовом отделении, но и непосредственно через редакцию, начиная с любого номера. Для этого направьте заявку по адресу: Украина, 65005, Одесса, ул. Прохоровская, 45, редакция "ТКЭА" или по e-mail: tkea@odessa.net

ПРИГЛАШАЕТ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА К СОТРУДНИЧЕСТВУ:

Вы можете подготовить статью — рекомендации авторам по подготовке рукописи опубликованы в этом номере;

Вы можете разместить в журнале рекламу;

Вы можете заказать издание книги;

Вы можете написать письмо по поводу, представляющему, на Ваш взгляд, интерес для читателей журнала;

Вы можете задать вопрос, который, как Вы считаете, интересует не только Вас.

Журнал "ТКЭА" — для Вас. Пишите (лучше по e-mail: tkea@odessa.net), приходите (г. Одесса, ул. Прохоровская, 45), звоните (048—733-67-91, 733-72-83)