

УДК 621.382

**РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ  
ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

В.А. Клименов, А.П. Мамонтов

Томский политехнический университет

E-mail: mamontov@tpu.ru

**Клименов Василий Александрович**, доктор технических наук, проректор-директор Института неразрушающего контроля, профессор ТПУ.

E-mail: mamontov@tpu.ru

Область научных интересов: материаловедение.

**Мамонтов Аркадий Павлович**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей физики ТПУ.

E-mail: mamontov@tpu.ru

Область научных интересов: радиационная физика.

Исследовано влияние характеристического рентгеновского излучения на полуизолирующий арсенид галлия, применяемый в качестве подложек при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем с помощью ионной имплантации и эпитаксии. Установлено, что изменение сопротивления при облучении позволяет получать информацию об однородности и термической стабильности пластин полуизолирующего арсенида галлия. Обсуждаются физические процессы, происходящие при облучении полуизолирующего арсенида галлия.

**Ключевые слова:**

Рентгеновское излучение, полуизолирующий GaAs, подложка, ионная имплантация, эпитаксия, сопротивление, стабильность.

Полуизолирующий арсенид галлия используется в качестве подложек при изготовлении различных полупроводниковых приборов и интегральных схем. При этом предъявляются высокие требования к однородности и термической стабильности полуизолирующего арсенида галлия [1]. Экспериментально установлено, что облучение полуизолирующего арсенида галлия характеристическим рентгеновским излучением (ХРИ) позволяет повысить однородность сопротивления по площади пластины арсенида галлия. Это обусловлено упорядочением структуры кристаллической решетки арсенида галлия при облучении ХРИ. Полуизолирующий арсенид галлия представляет собой сложную систему: арсенид галлия + компенсирующая ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и др.) и фоновая ( $\text{Si}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Mn}$  и др.) примеси [2].

Эта система после выращивания слитка находится в состоянии, весьма далеком от состояния термодинамического равновесия. Полученное состояние определяет уровень термической стабильности полуизолирующего арсенида галлия. При воздействии ХРИ метастабильные состояния примесей и дефектов, захватывая квант энергии излучения, возбуждаются и после взаимодействия с кристаллической решеткой арсенида галлия переходят в новое термодинамически более устойчивое состояние по сравнению с исходным состоянием. Отжиг, проводимый после облучения ХРИ, ускоряет процесс перехода из одного состояния в другое. В областях кристалла арсенида галлия с высокой концентрацией примесей и дефектов энергетические переходы происходят более интенсивно. Это приводит к повышению однородности и улучшению характеристик кристаллов полуизолирующего арсенида галлия. В то время междоузельные атомы, генетически не связанные с вакансиями, устремляются на стоки, которыми являются дислокации и поверхность полупроводникового материала. Это приводит к ухудшению характеристик полуизолирующего арсенида галлия. Эти пластины нецелесообразно использовать в качестве подложечного материала для изготовления полупроводниковых приборов [3].

Принцип отбора высококачественного термостабильного полуизолирующего арсенида галлия основан на сравнении электрического сопротивления пластин полуизолирующего арсенида галлия, измеренного до и после облучения и отжига. Этот метод обладает многими преимуществами, которые выражаются в том, что по изменению сопротивления имеется возможность определять пригодность пластин полуизолирующего арсенида галлия для изготовления полупроводниковых приборов с высоким качеством.

Диапазон измерения сопротивления пластин полуизолирующего арсенида галлия составляет  $10^6 \dots 10^{12}$  Ом, напряжение на измерительных зондах до 100 В. Измерения проводятся при температуре окружающей среды от +18 до +25 °С. Относительная влажность не более 80 %, атмосферное давление 100 кПа. К прижимным зондам предъявляются особые требования. Площадь их касания с измеряемой пластиной должна быть не более  $0,5 \text{ мм}^2$ , расстояние между зондами – не менее 3 мм.

К измерительной площадке контактирующего устройства предъявляются определенные требования. Поперечные размеры полезной площади измерительной площадки должны соответствовать поперечным размерам целой пластины полуизолирующего арсенида галлия. Измерительная площадка должна быть покрыта полиэтиленовой пленкой. Пластины полуизолирующего арсенида галлия должны быть механически шлифованные, полированные и химически протравленные. Размеры пластин должны быть не менее  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ .

Облучение пластин ХРИ проводится на установке ионной имплантации «Везувий» [4]. Поток ионов облучают металлическую фольгу. При этом в результате взаимодействия ионов с атомами металла возникает характеристическое рентгеновское излучение, которое воздействует на пластину полуизолирующего арсенида галлия. Доза характеристического рентгеновского излучения составляет  $4 \dots 10 \text{ Р}$ . Поперечное сечение потока ионов должно соответствовать или превышать поперечные размеры исследуемых пластин. Поток ионов должен быть равномерно распределен по площади сечения пучка [5].

Металлическая фольга должна иметь поперечные размеры на  $1 \dots 5$  мм больше, чем поперечные размеры исследуемой пластины; толщину, превышающую величину пробега бомбардирующих ионов; бомбардирующие ионы не должны попадать на полупроводниковую пластину. Отжиг облученных пластин должен производиться в печах, допускающих отжиг в атмосфере водорода. После облучения пластины вынимают из облучательной установки, освобождают от металлической фольги и отжигают при температуре  $230 \dots 400$  °С в течение 25 мин. Интервал температуры и времени отжига определен экспериментально, как обеспечивающий наилучший эффект при отборе термостабильного и однородного материала. При меньшей температуре тепловой энергии недостаточно для перехода системы из одного состояния в другое. При температуре более  $400$  °С начинается заметная сублимация GaAs, обусловленная преимущественной потерей As, и результаты измерения сопротивления некорректны, поскольку они могут быть связаны не с объемом материала, а с поверхностными эффектами. После облучения и отжига измеряют сопротивление каждой пластины двухзондовым методом [6], проводится расчет удельного сопротивления  $\rho_0$  исходного материала и расчет удельного сопротивления  $\rho$  материала после облучения. К термостабильным относят пластины, которые не изменили или повысили свое удельное сопротивление. Результаты отбора пластин полуизолирующего арсенида галлия приведены в таблице.

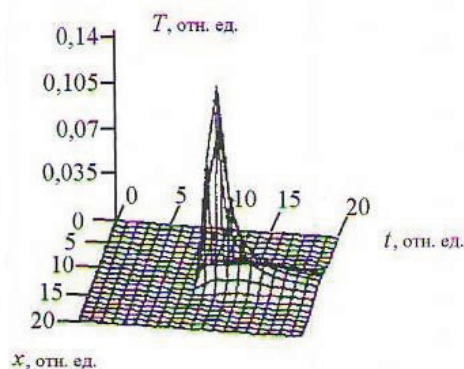
**Таблица.** Влияние ХРИ на удельное сопротивление GaAs и напряжение пробоя диодов

№ пластины	$\rho_0, \text{ Ом} \cdot \text{см}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{см}$	$(\rho - \rho_0) / \rho_0$	$U_{\text{пробоя}}, \text{ В}$
1	$1,1 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	+36,4	65
2	$6,6 \cdot 10^8$	$5,1 \cdot 10^8$	-22,7	16
3	$3,4 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^9$	+2,9	41
4	$8,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$	+24,4	56
5	$1,1 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^7$	-56,5	10
6	$2,8 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9$	-50,0	14
7	$7,5 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^8$	-36,0	18
8	$6,4 \cdot 10^8$	$6,5 \cdot 10^8$	+1,5	39
9	$3,7 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^9$	+2,7	40
10	$8,3 \cdot 10^7$	$9,2 \cdot 10^7$	+12	50
11	$9,9 \cdot 10^7$	$8,4 \cdot 10^7$	-15,2	18
12	$8,9 \cdot 10^8$	$9,6 \cdot 10^8$	+7,8	48
13	$3,3 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	-42,3	16
14	$4,5 \cdot 10^8$	$5,7 \cdot 10^8$	+26,7	59
15	$4,4 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^9$	+4,5	46

В таблице приведены также данные о напряжении пробоя диодов диаметром 0,3 мм, изготовленных на эпитаксиальных слоях GaAs. Эпитаксиальные слои GaAs выращивались на подложках полуизолирующего GaAs методом газотранспортной эпитаксии. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 2,5...3,1 мкм. Изготовленные слои легировались кремнием. Концентрация электронов в эпитаксиальных слоях составляла около  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Уменьшение количества дефектов и упорядочение структуры полуизолирующего GaAs возможно только в результате освобождения запасенной в кристаллической решетке энергии. При облучении происходят цепные процессы аннигиляции междоузельных атомов с генетически связанными вакансиями.

Генерация акустических волн при облучении рентгеновскими лучами обусловлена тем, что в процессе облучения таких неравновесных материалов, какими являются полупроводники, происходит аннигиляция междоузельных атомов с генетически связанными вакансиями. В области аннигиляции дефектов возникает тепловая вспышка (рисунок) за счет освобождения запасенной в кристаллической решетке энергии, которая составляет порядка 10 эВ [7].



**Рисунок.** Распределение температуры  $T$  во времени  $t$  и пространстве  $X$  в полупроводнике, обусловленной аннигиляцией междоузельного атома с генетически связанной вакансией в процессе облучения рентгеновскими лучами

Освобождение запасенной энергии приводит к резкому возрастанию температуры в ограниченном объеме, затем температура практически мгновенно уменьшается до температуры среды, окружающей область аннигиляции дефекта. Источник тепла, обусловленного аннигиляцией междоузельного атома с генетически связанной вакансией, в начальный момент времени помещен в однородное не движущееся тело в виде точки ( $n = 3$ ). Никаких других источников тепла в этот и последующие моменты времени не имеется. Соответствующий интеграл от температуры, распространенной на все пространство, который пропорционален этому количеству тепла и, следовательно, не зависит от времени, равен единице. Тогда в момент времени  $t = \frac{y}{4\alpha^2}$  температура  $T$  на расстоянии  $X$  от начала координат будет равна

$$T = \frac{e^{-\frac{x^2}{y}}}{\sqrt{(\pi y)^n}}$$

где  $y$  – время распределения тепла от нагретой точки,  $\alpha^2$  – коэффициент теплопроводности тела. Функция распространения тепла от нагретой точки представляет собой изотермы – сферические поверхности [8, 9].

Расчеты показывают, что температура в области аннигиляции междоузельного атома с генетически связанной вакансией, составляет 1300...1600 K и зависит от теплопроводности материала [10]. Температура уменьшается до температуры окружающей среды в течение 14...19 мкс. Возникает ударная волна, которая распространяется по материалу и улучшает его качество.

Возникновение ударных волн при облучении рентгеновскими лучами изучалось методом акустической эмиссии. При облучении рентгеновскими лучами полуизолирующего арсенида галлия появляются состояния, маловероятные с позиций равновесной термодинамики.

Возникновение этих состояний сопровождается появлением акустических волн, параметры которых зависят от состояния исходной структуры материала. В связи с этим для контроля качества полуизолирующего арсенида галлия перспективным является метод акустической эмиссии, генерируемой в процессе облучения рентгеновскими лучами.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе облучения материала рентгеновскими лучами применялась установка, которая позволяла регистрировать колебания поверхности материала пьезоэлектрическим датчиком, преобразующим механические колебания в электрические. Электрические сигналы после прохождения многоканального анализатора импульсов регистрировались счетчиком импульсов.

В зависимости от направления колебаний частиц относительно пластины арсенида галлия возникает несколько типов волн. Если частицы материала колеблются вдоль образца, то в нем возникают и распространяются деформации сжатия–растяжения и появляется продольная волна. Если же частицы колеблются перпендикулярно образцу, возникают и распространяются деформации сдвига и появляются поперечные и сдвиговые волны. Продольные волны возникают во всех средах, тогда как поперечные волны – только в твердых телах, обладающих сдвиговой упругостью.

Скорость распространения продольной  $C_1$  и поперечной  $C_2$  волн зависит от модуля продольной деформации  $E$  (модуль Юнга) и коэффициента поперечного сжатия  $\nu_p$  (коэффициент Пуассона). Возникающая в полуизолирующем арсениде галлия бегущая волна ослабляется с расстоянием вследствие ее затухания. Зависимость ослабления в случае плоской волны с начальной амплитудой  $A_0$ , происходящей на расстоянии  $r$ , выражается формулой

$$A = A_0 \exp(-Kr),$$

где  $K$  – коэффициент затухания, который определяется величиной коэффициента поглощения  $K_n$  и рассеяния  $K_p$ , т. е.  $K_n + K_p$ .

Вследствие эффектов внутреннего трения, неидеальных упругих свойств полуизолирующего арсенида галлия и других факторов звуковая энергия уходит в стороны от направления распространения волн.

Энергия звуковых колебаний регистрировалась преобразователем, в качестве которого использовался датчик из пьезокерамики в виде диска (поляризованного по толщине) диаметром  $d = 20$  мм и толщиной  $h = 5$  мм. Частота основного резонанса для продольных колебаний ненагруженного диска определялась из соотношения

$$f_{рез} = \frac{h}{2} \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $\rho$  – плотность пьезокерамики,  $h$  – толщина пьезоэлектрического образца.

Пластины полуизолирующего арсенида галлия помещались в установку для измерения сигналов акустической эмиссии, где они облучались рентгеновскими лучами, получаемыми от рентгеновской установки типа РУП-10. Количество импульсов акустической эмиссии определяется концентрацией имеющихся в материале дефектов. В более совершенном по структуре материале имеется меньше центров, рассеивающих акустические волны, и в связи с этим регистрируется большее количество импульсов акустической эмиссии. Области аннигиляции дефектов в этом случае являются точками бифуркаций, определяющими самоорганизацию полуизолирующего арсенида галлия в процессе облучения рентгеновскими лучами.

Необходимо отметить, что импульсы акустической эмиссии наблюдаются лишь в течение 30 с, поскольку в процессе облучения изменяется сам характер взаимодействия рентгеновского излучения с полуизолирующим арсенидом галлия. Наиболее вероятной причиной этого является возникающая интерференция рентгеновских лучей с акустическими волнами.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Облучение полуизолирующего арсенида галлия рентгеновским излучением позволяет повысить однородность и улучшить характеристики кристаллов.

2. Отбор высококачественного термостабильного полуизолирующего арсенида галлия основан на сравнении электрического сопротивления пластин до облучения и после облучения и отжига.
3. Повышение качества пластин полуизолирующего арсенида галлия обусловлено освобождением запасенной в его кристаллической решетке энергии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «НАУКА».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильвидский М.Г., Уфимцев В.В. Полупроводниковые материалы на современном этапе развития твердотельной электроники // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36. – № 3. – С. 360–368.
2. Арсенид галлия. Получение и свойства / под ред. Ф.П. Кесаманлы, Д.Н. Наследова. – М.: Наука, 1973. – 472 с.
3. Арсенид галлия в микроэлектронике / Пер. с англ. под ред. Н. Айнспрука, У. Уисмена. – М.: Мир, 1988. – 555 с.
4. Эйзен Ф.Н. Имплантация ионов в соединениях // в кн. Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы. – М.: Мир, 1980. – С. 92–130.
5. Higgins J.A., Kuvav R.L., Eisen F.H., Ch'en D.R. Low-noise GaAs FET's prepared by ion implantation // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1978. – V. 25. – Issue 6. – С. 587–596.
6. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1970. – 432 с.
7. Пахаруков Ю.В. Некоторые аспекты радиационного упорядочения // ФТП. – 1989. – Т. 23. – № 5. – С. 391–402.
8. Кузнецов Д.С. Специальные функции. – М.: Высшая школа, 1962. – 249 с.
9. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложение. – СПб: Лань, 2010. – 359 с.
10. Сирота Н.Н. О теплопроводности решетки твердых тел // ДАН СССР. – 1991. – Т. 317. – № 6. – С. 1380–1385.

Поступила 11.04.2012 г.