

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
к. ф.-м. н. Э. Н. ЯКУБОВ

Узбекистан, г. Ташкент. НПО «Физика–Солнце»  
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
12.05 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ВЫРАЩИВАНИЯ

*Экспериментально установлено, что изменяя условия выращивания, можно получить эпитаксиальные слои с требуемыми параметрами (толщиной, подвижностью и концентрацией носителей заряда).*

При разработке полупроводниковых структур на основе тонких (около 1 мкм) эпитаксиальных слоев и пористых структур стоит задача определения (прямо или косвенно) их основных параметров. Однако для пористых материалов интерпретация результатов измерения подвижности носителей заряда традиционными методами (например при помощи эффекта Холла) затруднена в силу их низких значений. В этом случае предлагается оценивать подвижность носителей по времени их пролета через образец [1].

С практической точки зрения особенно важной становится задача оценки электрофизических параметров арсенида галлия, определяющих свойства полупроводниковых приборов на его основе [2]. В частности, для получения структур с высокой фоточувствительностью необходимо формировать их активные области с максимально возможной подвижностью носителей заряда, а для термочувствительных структур следует подавить зависимость подвижности от температуры.

Таким образом, знание путей управления характеристиками носителей заряда с учетом зависимости их подвижности от концентрации играет важную роль в развитии технологии получения полупроводниковых структур. В этом аспекте, изменение температурного режима получения активной области также может служить инструментом управления зависимостью подвижности носителей от их концентрации.

Изучение этих сложных зависимостей требует привлечения соответствующих методов определения подвижности носителей в активной области, например метод определения подвижности носителей по температурной зависимости выходных вольт-амперных характеристик модельных структур типа полевого транзистора [3]. На объемных образцах подвижность носителей заряда и тип проводимости определяется широко используемым методом, основанным на эффекте Холла [4]. Однако эти методы не позволяют

точно определить подвижность носителей заряда в тонких эпитаксиальных слоях, поскольку требуют изготовления образцов определенных размеров. Так, в наиболее широко используемых методах, основанных на эффекте Холла и магниторезистивном эффекте, соотношение геометрических размеров образца и местоположение контактов могут существенно влиять на результаты измерений. Согласно теории, металлические контакты к образцам, предназначенным для измерения ЭДС Холла, должны иметь малую площадь, чтобы не исказить линии тока в образце. Поэтому в ряде случаев к измеряемым образцам создают боковые отростки гантелеобразной формы. При этом образец должен быть достаточно длинным.

Для образцов с симметричным расположением двух ЭДС-контактов отношение длины образца к ширине должно быть больше четырех. При исследовании образцов произвольной формы используют четырехзондовый метод [4]. Следует отметить, что при измерениях по методу «ЭДС Холла» в высокоомных образцах параметр, определяющий подвижность носителей заряда ( $\Delta\rho_x/\rho$ ), изменяется под воздействием магнитного поля лишь на 2%, а в случае коротких образцов, когда проявляется эффект геометрического магнитосопротивления, изменения  $\Delta\rho_x/\rho$  составляют около 50% [4]. Кроме того, методы Холла для измерения параметров образцов с тонкой активной областью или малыми размерами не могут быть использованы напрямую. Например, в экспрессном методе необходимо поддерживать задаваемое фиксированное значение тока [5]. Применительно к тонким пленкам необходимо сохранять низкие значения тока (от 10 до 100 мкА), которые не могут быть обеспечены с помощью стандартных блоков питания. Вопрос требует особого решения.

Целью настоящей работы является определение экспресс-методом подвижности носителей заряда в эпитаксиальных слоях, служащих активной областью полупроводниковой структуры, и установление корреляции между технологическими условиями ее получения и основными параметрами активной области (например, эпитаксиального слоя арсенида галлия  $n$ -типа проводимости, служащего каналом полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, а также активной областью структур с барьером Шоттки).

**Усовершенствование экспресс-методики определения подвижности носителей заряда**

По сравнению с известными, используемая в [5] методика определения подвижности носителей в диодах Ганна является экспрессной. В этом методе, наряду с поддержкой фиксированного значения рабочего тока, необходимо выполнять условие линейности зависимости тока от напряжения, т. е. необходимо проводить измерения при малых напряжениях (порядка 0,025—0,08 В).

Для реализации экспресс-метода измерения подвижности носителей заряда в тонких пленках в измерительную установку Холла был введен специальный узел (СУ) на полевом транзисторе, обеспечивающий прецизионное регулирование фиксированного тока через исследуемый образец (рис. 1). Магнитный узел (МУ) выполнен на электромагните, напряженность магнитного поля которого регулируется изменением рабочего тока. Его питание осуществляется от стабилизатора с выпрямителем, который через переключатель П<sub>2</sub> соединяется с катушкой электромагнита L. Ток катушки изменяется с помощью регулятора R<sub>2</sub> и фиксируется амперметром А. Значение напряженности магнитного поля определяется измерителем. Блок измерения состоит из источника тока E, переключателя полярности П<sub>1</sub> и СУ на полевом транзисторе (ПТ), ток которого регулируется резистором R<sub>1</sub>. От держателя образца ДО идут выводы для подключения образцов Холла, предназначенных для измерения как проводимости, так и подвижности носителей заряда. Выбор режимов осуществляется переключателем П<sub>3</sub>. В режиме тока Холла к токоподводящим контактам подключается вольтметр.

Следует отметить, что традиционно подвижность носителей заряда по току Холла определяется на основании измерений сопротивления образца в отсутствие магнитного поля  $R(0)=V(0)/I(0)$  и в магнитном

поле  $R(B)=V(B)/I(B)$ , где  $I(0)$  и  $I(B)$  — соответствующие токи Холла. Затем эти значения подставляют в формулу для определения подвижности носителей заряда:

$$\mu_T = \frac{1}{B} \left[ \frac{\Delta R(B)}{R(0)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta R=R(0)-R(B)$ .

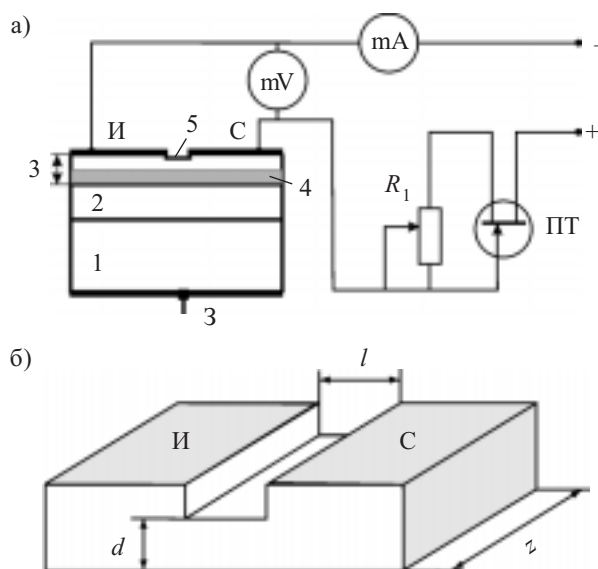


Рис. 2. Структура типа полевого транзистора с эпитаксиальным p-n-переходом:

a — подключение в режиме плавающего затвора к схеме экспресс-установки Холла; б — сечение активной области; l — подложка p<sup>+</sup>GaAs; 2 — промежуточный слой pGaAs; 3 — эпитаксиальный слой nGaAs; 4 — слой объемного заряда; 5 — расстояние между стоком С и истоком И (длина канала l); 3 — затвор; z — ширина канала

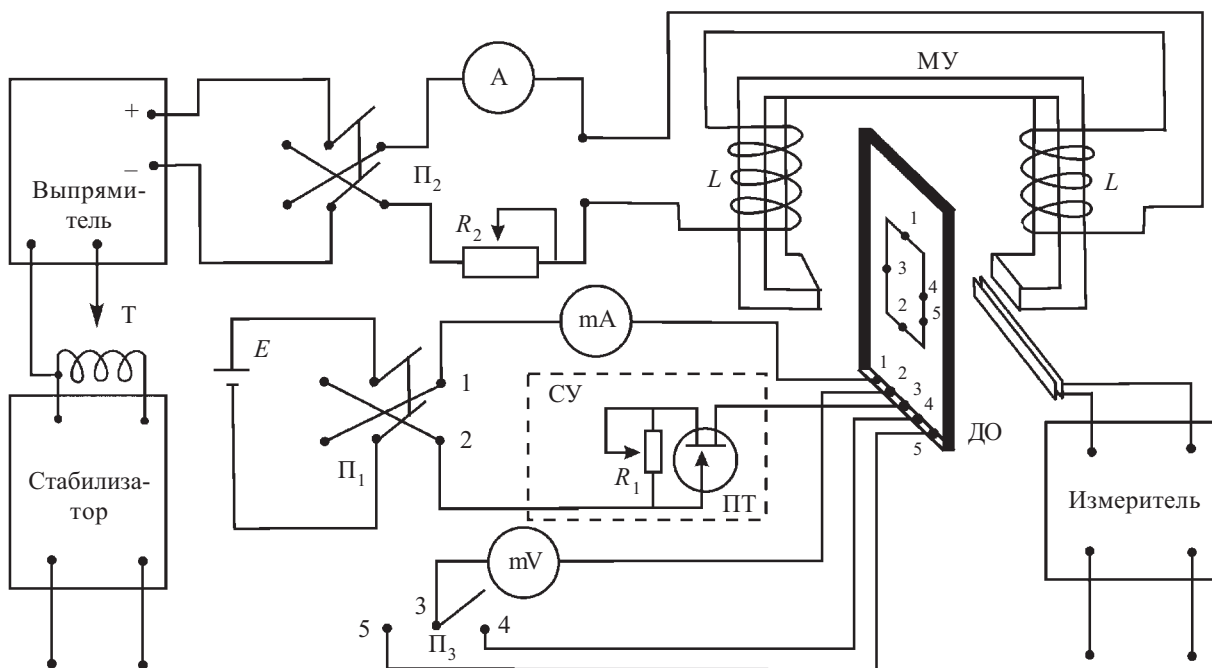


Рис. 1. Блок-схема универсальной усовершенствованной измерительной установки Холла

В нашем же случае при заданном фиксированном токе  $I = \text{const}$ , задаваемом СУ, измеряли падение напряжения в отсутствие магнитного поля  $V(0)$  и в магнитном поле  $V(B)$ , и определяли подвижность носителей заряда по формуле [5]

$$\mu_T = \frac{1}{B} \left[ \frac{\Delta V(B)}{V(0)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta V = V(B) - V(0)$ , причем  $\mu_T B \ll 1$ .

Затем на основании данных о подвижности носителей заряда и геометрических размеров образца оценивали концентрацию носителей заряда по формуле

$$N = I / (q \mu_T S R), \quad (3)$$

где  $l$  — расстояние между контактами;

$\mu_T$  — подвижность носителей заряда;

$S$  — сечение активной области,  $S = dZ$  (рис. 2, б).

Возможности настоящей методики можно расширить вплоть до определения подвижности по толщине активной области.

### Исследование корреляции основных параметров активной области и технологических условий роста пленок

Предложенную методику можно применить для установления корреляции технологического процесса и параметров выращиваемых активных слоев. Для этой цели были изготовлены модели структуры типа полевого транзистора. Подключение модели к схеме измерительной установки показано на рис. 2. Исследуемые структуры получены по технологии создания резких  $p$ - $n$ -переходов [6] методом жидкостной эпитаксии на подложках  $p^+$ GaAs с выращенным промежуточным слоем  $p$ GaAs и эпитаксиальным слоем  $n$ GaAs, создающим  $p$ - $n$ -переход со слоем объемно заряда.

В расворе-расплаве (Ga+GaAs), из которого выращивался эпитаксиальный слой  $n$ GaAs, в одном случае растворяли монокристаллический  $n$ GaAs, легированный Te с концентрацией  $N = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , в другом случае — GaAs, содержащий по 0,1% Te и Si, и в последнем случае —  $n$ GaAs, легированный Sn. В результате были получены образцы с  $p$ - $n$ -переходами, где  $n$ -области отличаются друг от друга легирующими примесями. Подложки из монокристаллического  $p^+$ GaAs, ориентированные в кристаллографическом направлении  $\{100\}$ , площадью  $10 \times 10 \text{ мм}$ , имели толщину 350—400 мкм. Толщина выращенных эпитаксиальных слоев  $n$ GaAs составляла 0,5—1,5 мкм. На их поверхности для формирования омических контактов, выполняющих роль стока (С) и истока (И), через маску напыляли сначала Sn, а затем — Ni. Расстояние между контактами, т. е. длина канала  $l$ , составляло 50 мкм, ширина канала — 0,7—1,0 мм при площади контакта стока (истока) 0,5—1 мм<sup>2</sup>. Толщина слоя активной области  $d$  доводилась до 0,5 мкм травлением в специальном растворе 5% NaOH + 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (при соотношении частей 5:1). С тыльной стороны подложки напылением никеля формировали контакт затвора (З). В исследуемых образцах отношение длины канала к ширине удовлетворяет условию  $(l/Z) \ll 1$ , что обеспечивает высокую точность измерений [5].

На основании исследования экспресс-методом концентрации и подвижности носителей заряда в моделях структур были получены исходные данные для определения корреляции параметров выращиваемых слоев с технологическими процессами. Известно, что при выборе технологии получения эпитаксиальных слоев основными критериями являются начальная и конечная температура роста пленок, т. к. подвижность носителей в выращенных пленках зависит от концентрации примесей, а концентрация, в свою очередь, зависит от температуры. Управляя начальной температурой процесса роста, можно получить режимы выращивания эпитаксиальных слоев с высокой подвижностью носителей заряда, необходимой для улучшения фотоусилительных свойств структур с  $p$ - $n$ -переходом (например фотодиодов и фототранзисторов).

Было изучено влияние изменения начальной температуры технологического процесса на параметры выращенных слоев с различными легирующими примесями. Экспериментальные структуры, полученные при разных технологических режимах, подключали к измерительной установке Холла (рис. 1), данные измерений подставляли в формулы (2) и (3). Результаты вычислений приведены в табл. 1. Как видно, в слоях, легированных одновременно Te и Si, подвижность носителей заряда (1000—500 см<sup>2</sup>/Вс) в два и более раза меньше, чем в слоях, легированных только Te (3200—1200 см<sup>2</sup>/Вс).

Таблица 1

Результаты расчета подвижности носителей заряда и их концентрации в эпитаксиальных слоях с различными легирующими примесями

Примесь	$T_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{СИ}}, 10^{-4} \text{ А}$	$\mu_T, \text{ см}^2/\text{Вс}$	$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Te	850	6	3200	1
Te	850	25	3200	1
Te	852	8	3100	5,5
Te	830	29	1200	6
Te+Si	845	25	500	4,45
Te+Si	845	8	500	4,45
Te+Si	852	2,2	1000	8

Другая тенденция — это уменьшение подвижности носителей заряда в два и более раза с понижением температуры роста слоев с 850 до 845 и 830°C. Уменьшение подвижности носителей заряда при введении совместно с теллуром кремния обусловлено донорно-акцепторными компенсирующими свойствами кремния. Факт уменьшения подвижности при снижении температуры роста можно объяснить увеличением концентрации носителей заряда в теллуре в выращиваемых слоях в связи с изменением его растворимости в арсениде галлия [7, с. 84—85].

В нашем случае, в связи с изменением начальной температуры изменяется ток через структуру, и корреляционные параметры определяются по зависимости

$$\frac{1}{\mu} \sim N \sim I(T_{\text{нач}}).$$

Рассмотрим эксперимент, в котором исследовалось влияние на подвижность и концентрацию носи-

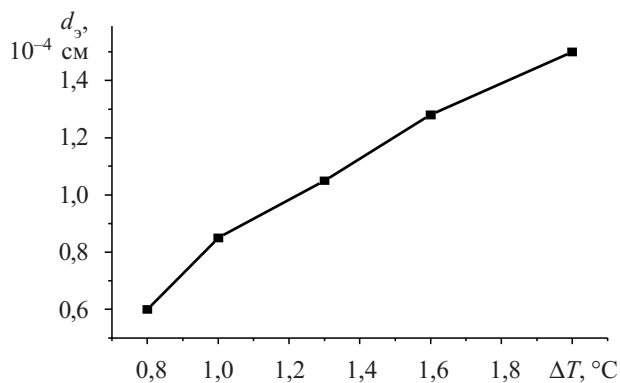


Рис. 3. Зависимость толщины выращиваемого слоя от интервала температуры процесса роста

телей заряда изменения интервала температуры роста слоев, легированных оловом, выращенных из равного количества растворов-расплавов с идентичными параметрами, т. е. с одинаковой концентрацией носителей в источнике и начальной температурой кристаллизации. Исходная толщина слоев определялась по измерениям вольт-емкостных характеристик, а исследование зависимости толщины от изменения температуры роста позволяет установить взаимосвязь технологического режима и параметров выращиваемых слоев. Установленная типичная усредненная зависимость толщины выращиваемого слоя  $d_s$  от интервала температуры процесса роста  $\Delta T = T_{\text{нач}} - T_{\text{конец}}$  при начальной температуре  $T_{\text{нач}} = 845^\circ\text{C}$  приведена на рис. 3.

Результаты измерений на усовершенствованной установке Холла (рис. 1) и определенные по формулам (2) и (3)  $\mu_r$  и  $N$  для арсенид-галлиевых эпитаксиальных слоев, легированных оловом, полученных при заданных интервалах температуры процесса выращивания, сведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что с уменьшением  $\Delta T$  толщина слоев, а также подвижность носителей заряда уменьшаются по определенной закономерности. Так, в эпитаксиальных слоях, выращенных из раствора-расплава с источником из  $n\text{GaAs}$ , легированного оловом с концентрацией не выше  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , концентрация носителей заряда лежит в интервале  $(1,23 - 1,92) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а подвижность носителей заряда изменяется в пределах  $5530 - 3550 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . При малом интервале температуры роста концентрация носителей в эпитаксиальных слоях  $(1,92 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3})$  сравни-

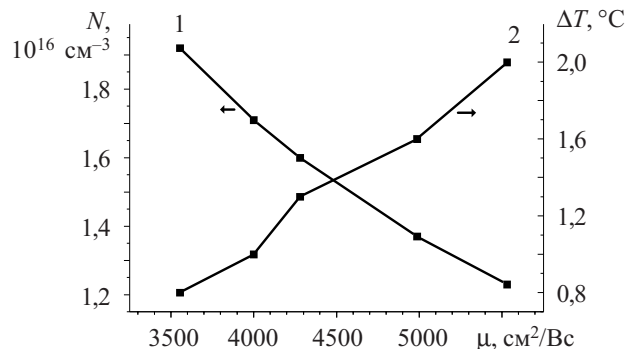


Рис. 4. Зависимость подвижности электронов от концентрации носителей заряда, характер которой задается интервалом температуры процесса жидкостной эпитаксии

ма с концентрацией в источнике ( $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). По мере увеличения  $\Delta T$  вместе с уменьшением концентрации носителей ( $1,23 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) увеличиваются значения подвижности носителей заряда ( $5530 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ).

В эпитаксиальных слоях, легированных теллуром, в отличие от слоев, легированных оловом, зависимость концентрации носителей от интервала температуры имеет возрастающий характер.

Анализ полученных данных показывает возможность управления параметрами выращиваемых эпитаксиальных слоев. Из рис. 4 видно, что основываясь на соответствующей зависимости подвижности от концентрации, характер которой определяется интервалом температуры роста слоев, можно получать слои с различными параметрами — с высокой подвижностью носителей заряда (для фоточувствительных структур) и с умеренной подвижностью (для теплочувствительных структур).

### Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что изменяя начальную температуру процесса выращивания, можно достигнуть участка на кривой зависимости  $N=f(\mu)$ , где начальные параметры эпитаксиального слоя определяются состоянием раствора-расплава. Подбирая интервал температуры процесса выращивания, можно получить слои с требуемой подвижностью и концентрацией носителей заряда.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Казакова Л. П., Мынбаева М. Г., Мынбаев К. Д. Дрейфовая подвижность носителей заряда в пористом карбиде кремния // Физика и техника полупроводников.— 2004.— Т. 38, вып. 9.— С. 1118—1120.
2. Ботнарюк М. В., Жилиев Ю. В., Орлова Т. А. и др. Корреляция электрофизических и люминесцентных свойств GaAs высокой чистоты // Письма в ЖТФ.— 2004.— Т. 30, вып. 19.— С. 25—29.
3. Малин Б. В., Сонин М. С. Параметры и свойства полевых транзисторов.— М.: Энергия, 1967.
4. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов.— М.: Высш. школа, 1987.
5. Larrable R. D., Walter A. H., Martin C. S. A rapid evaluation technique for functional Gunn diodes // IEEE Transactions on Electron Devices.— 1970.— Vol. e-17, N. 4.— P. 271—274.
6. А. с. 762253 СССР. Способ получения  $p-n$ -переходов на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  / А. В. Каримов, М. Мирзабаев.— 16.05 1980.
7. Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов.— М.: Сов. радио, 1975.

Таблица 2  
Экспериментально-расчетные данные для эпитаксиальных слоев, легированных Sn

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2	1,6	1,3	1	0,8
$d_s, 10^{-4} \text{ см}$	1,5	1,28	1,05	0,85	0,6
$V, \text{ В}$	0,054	0,074	0,055	0,03	0,019
$I_{\text{си}}, 10^{-7} \text{ А}$	1,23	1,45	0,88	0,39	0,17
$V(\bar{B}), \text{ В}$	0,058	0,079	0,057	0,031	0,019
$\Delta V, \text{ В}$	0,004	0,0046	0,0025	0,0012	0,0006
$\mu_r, \text{ см}^2/\text{Вс}$	5530	4986	4279	4000	3550
$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	1,23	1,37	1,6	1,71	1,92