

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО БЛИСТЕРИНГА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, МОРФОЛОГИЮ 3Д СТРУКТУРЫ АНТИМОНИДА ИНДИЯ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

И. В. Перинская

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77

Статья поступила в редакцию 19 марта 2018 г.

Аннотация. Исследовано влияние облучения ионами гелия с ускоряющим напряжением 200 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$ ион/см² для образования квазипористой структуры на глубину слоя эпитаксиального антимонида индия вплоть до подложки арсенида галлия на электрическое сопротивление морфологию скола, характер, клин травления при изготовлении рельефного топологического рисунка микроминиатюрных преобразователей Холла на основе механизма блистеринга. Установленный режим ионно-ускоренного локального прецизионного химического травления квазипористого антимонида индия с целью образования необходимого клина травления топологического рисунка положен в основу технологии уменьшения остаточного напряжения датчиков Холла, используемых в СВЧ твердотельной электронике.

Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, ионная имплантация, механизм блистеринга, гетероэпитаксиальный антимонид индия.

Abstract. Radiation influence by helium ions with energy 200 keV and a dose $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$ ion /sm² for formation of quasiporous structure on depth a layer of epitaxial antimonite India is investigated up to a gallium arsenide substrate on chip morphology, character, an etching wedge at production of relief topological drawing microminiature converters of the Hall on the basis of the blistering mechanism.

The samples were GaAs-based n-InSb-i-GaAs with the thickness of the epitaxial film of indium antimonide 2 μm. Implantation of helium ions (He⁺) was carried out in vacuum 10^{-5} Pa in continuous mode. The dose of implantation varied within $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$ ion/cm², ion current density $1 \cdot 10^{-9}$ - $3 \cdot 10^{-6}$ A·cm⁻². Chemical etching to the

substrate of gallium arsenide was carried out with layer-by-layer control of resistivity by a four-probe method.

The nature of etching of the epitaxial layers of antimonite implanted by ions of helium India on depth was studied on a raster electronic microscope, a wedge of etching and topology of the – sensor on an optical microscope in various chemical solutions.

An experimental dependence of the conductivity of n-InSb-i-GaAs samples implanted by helium ions with an energy of 100, 200 keV in the dose range of helium ions was obtained. The wedge of etching the samples of the upper part of the cross-section to a depth of 1.5 μm is equal to 90°.

As a result on a plate of structure n-InSb-i-GaAs in one process (a group way) 400 pieces of primary converters of Hall with the size of residual tension of $\leq 0,05$ mV are received. An exit of suitable has made 86%.

The set mode of the ion-accelerated local precision chemical etching of quasiporous antimonite India for the purpose formation a necessary wedge of etching the topological drawing is the basis for technology of reduction residual tension the sensors of Hall used in the microwave oven to solid-state electronics.

Keywords: ion-beam processing, ionic implantation, blistering mechanism, heteroepitaxial India antimonite.

1. Введение

Из-за своих малых габаритов микроминиатюрные преобразователи Холла для твердотельной электроники на основе гетероструктур $A^{III}B^V$ -i-GaAs могут использоваться в условиях жестких спецвоздействий: сверхнизкие температуры, космический вакуум, ударные перегрузки в 10^3g и т.д. Из гетероструктур этого класса особенно перспективны n-InSb-i-GaAs в следствие высокой подвижности носителей заряда (электронов).

Величина остаточного напряжения полупроводниковых преобразователей Холла определяется несколькими составляющими, одна из которых – неконтролируемый подтрав боковой поверхности преобразователей при

формировании 3Д топологии рабочего тела методом химического травления. Причем величина этого подтравы у формируемых структур преобразователей Холла имеет существенный разброс по площади полупроводниковой пластины.

Высказанная автором идея заключается в использовании образованных ионно-лучевой модификацией (ИЛМ) блистеров на поверхности гетероэпитаксиального слоя антимида индия на подложке арсенида галлия, структуры, используемой при изготовлении датчиков Холла, для обеспечения процесса локального, воспроизводимого химического травления топологии субмикронных размеров.

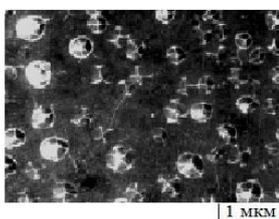


Рис.1. Блистеры на поверхности монокристаллического полупроводника, облученного ионами гелия при энергии 100 кэВ и дозе $6 \cdot 10^{17}$ ион/см²

Начало интенсивного исследования блистеринга связано с созданием термоядерного реактора, поскольку первая стенка реактора подвергается интенсивному облучению высокоэнергетичными ионами, в том числе, гелия [1]. Блистеринг рассматривается как один из опаснейших механизмов эрозии материалов, поскольку коэффициент эрозии материала при гелиевом блистеринге может превышать на 1-2 порядка коэффициент распыления того же материала ионами гелия и к настоящему времени изучены основные закономерности блистеринга в металлах и порообразование при облучении ионами гелия [2,3].

Для появления блистеров необходима некоторая минимальная доза облучения (критическая доза образования блистеров $\Phi_{кр}$) ионами плохо растворимого газа. Она растет с ростом энергии ионов в диапазоне $E=100 \div 200$ кэВ, когда доза принимает значение $\Phi_{кр}=6 \cdot 10^{17} \div 6 \cdot 10^{18}$ ион/см² [3,4]. Характер образования блистеров – образование пор – определяется так же температурой мишени во время облучения [5,6], причем, при температурах $T_{обл} > 0,5 \div 0,6 T_{пл}$

($T_{пл}$ – температура плавления мишени) из блистеров образуется пористая поверхность.

В полупроводниковых кристаллах эффекты формирования пор при имплантации легких ионов исследованы существенно меньше в сравнении с металлами и имеются особенности формирования и свойств таких слоев [7,8].

Известно, что на характер ионной гелиевой эрозии влияет наличие кристаллографической ориентации, характерной для монокристаллов полупроводников и эпитаксиальных полупроводниковых слоев. Вследствие анизотропии свойств блистеры на монокристаллах имеют специфическую (треугольную, например, для грани $\{111\}$) форму [8].

Следует отметить, что тематика практических исследований и применений пористых слоев, сформированных в полупроводниках имплантацией ионов инертных газов, ограничена практически только случаем пор в кремнии [6].

Имплантация ионов гелия с энергией 200 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$ ион/см² для образования квазипористой структуры на глубину слоя эпитаксиального антимонида индия вплоть до подложки арсенида галлия (рис. 2) нашла свое воплощение в настоящей работе при формировании топологии микроминиатюрных датчиков Холла селективным химическим травлением.

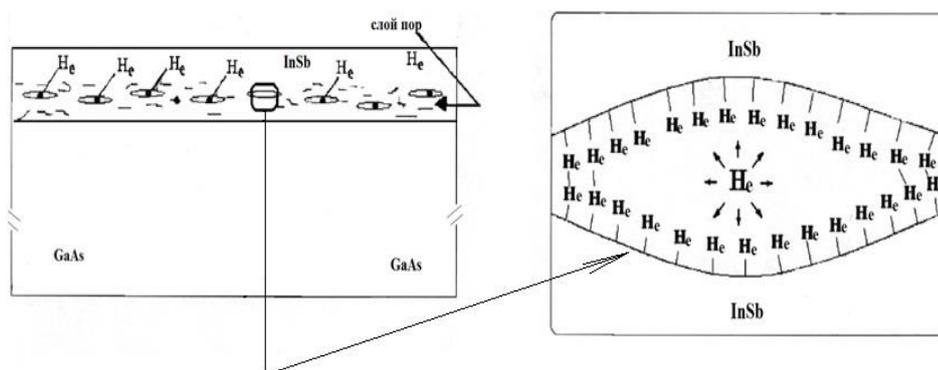


Рис. 2. Схематическое изображение гетероэпитаксиальной структуры антимонида индия на арсениде галлия после высокодозной имплантации гелия, иллюстрирующее образование пор, наполненных гелием

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры n-InSb-i-GaAs с толщиной гетероэпитаксиальной пленки антимида индия 2 мкм с ориентацией {110} использованы вследствие наличия необходимой высокой подвижности носителей заряда (электронов). Имплантация ионов гелия производилась на установке ионного легирования «Везувий-5» с $E=100-200$ кэВ. При изготовлении рельефного топологического рисунка микроминиатюрных преобразователей Холла на основе гетероэпитаксиальных пленок антимида индия использовалась маска фоторезиста ФП-383 толщиной 0,8 мкм, достаточной для маскирования поверхности полупроводника и, таким образом, получения локальных пористых областей имплантацией ионов гелия.

Далее образцы закрепляли на держателе и проводили имплантацию ионов гелия (He^+) в вакууме 10^{-5} Па в непрерывном режиме. Внедрение ионов проводили нормально к поверхности образцов. Дозу имплантации варьировали в пределах $6 \cdot 10^{17} - 6 \cdot 10^{18}$ ион/см², плотность ионного тока $1 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-6}$ А·см⁻². Энергию ионов при имплантации выбирали таким образом, чтобы блистеры образовывались по всей толщине эпитаксиального слоя, температуру образцов контролировали с помощью платино-платинородиевой термопары. При наибольшей имплантированной дозе ионов температура образцов находилась в пределах $T_{обл} > 0,5 \div 0,6 T_{пл}$. Химическое травление до подложки арсенида галлия осуществлялось с послойным контролем удельного сопротивления четырехзондовым методом.

Таблица 1 – Составы химических травителей

№	Состав химического травителя
1	$HNO_3:HF=1:1$
2	$HNO_3:HCl=1:1$
3	$H_2O_2:HF=1:1$
4	$HNO_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3$
5	$HNO_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3 (T_r \sim 35^\circ C)$
6	$HNO_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3$

Характер травления имплантированных ионами гелия эпитаксиальных слоев антимонида индия по глубине изучался на растровом электронном микроскопе ($\times 20000$), клин травления и топология датчика – на оптическом микроскопе соответственно при увеличении ($\times 700$) и ($\times 200$) в различных химических травителях (табл.1).

3. Анализ результатов

На рисунке 3 представлена экспериментальная зависимость проводимости образцов n-InSb-i-GaAs имплантированных ионами гелия с энергией 100, 200 кэВ в диапазоне доз ионов гелия.

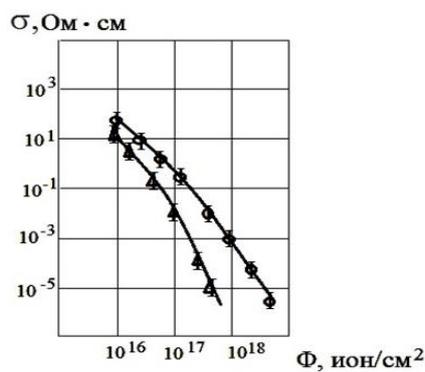


Рис.3. Экспериментальная зависимость проводимости образца n-InSb-i-GaAs имплантированного ионами гелия (He^+) с энергией: Δ -200 кэВ; о -100 кэВ

Аналогичную зависимость на структурах n-GaAs-i-GaAs наблюдали в работе [6], авторы которой объяснили уменьшение σ с позиций прыжкового механизма проводимости по локализованным состояниям дефектов вблизи уровня Ферми. Причем минимальное значение σ соответствует наибольшей концентрации дефектов для кристаллических тел при аморфизации их структуры.

На рисунке 4 представлен, экспериментально наблюдаемый на растровом электронном микроскопе ($\times 20000$), вертикальный скол образца антимонид индия - арсенид галлия, облученного пучком ионов гелия (He^+) с последующим химическим травлением.

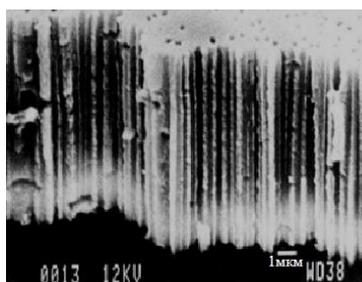


Рис. 4. Скол образца антимионид индия-арсенид галлия, облученного пучком ионов гелия (He^+) с последующим химическим травлением в режиме 6 (табл. 2)

Таблица 2 – Зависимость клина травления антимионида индия от состава химического травителя и режима ионно-лучевого облучения

№ п.п.	Состав химического травителя	Режим ИЛМ	Время травления, с	Размер по чертежу, мкм	Отклонение от заданного размера, %	Клин травления
1	$HNO_3:HF=1:1$	-	5	30,0	40	18°
2	$HNO_3:HCl=1:1$	-	7	30,0	43	31°
3	$H_2O_2:HF=1:1$	-	15	30,0	53	14°
4	$HNO_3:40\%$ винная кислота=1:3	-	420	30,0	6	76°
5	$HNO_3:40\%$ винная кислота=1:3 ($T_T \sim 35^\circ C$)	-	180	30,0	5,7	77°
6	$HNO_3:40\%$ винная кислота=1:3	$E=200кэВ$ $\Phi=6 \cdot 10^{18}$ ион/см ²	220	30,0	0	90°

На рисунке 5 приведена фотография клина травления элемента топологии первичного преобразователя Холла, изготовленного химическим травлением через маску фоторезиста в режиме 6 таблицы 2 после имплантации ионов гелия.

Клин травления имеет два угла наклона – в верхней части поперечного сечения до глубины 1,5 мкм клин травления практически равен 90° ; далее угол наклона уменьшается до величины 77° , соответствующей клину при травлении в режиме № 5.

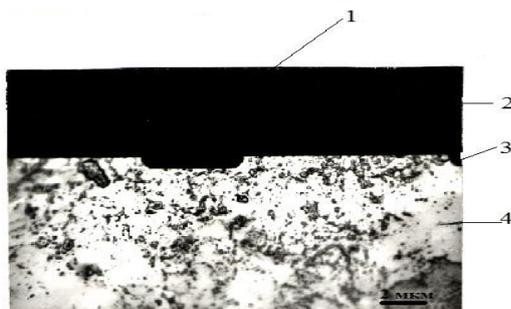


Рис. 5. Вид поперечного шлифа элемента топологии первичного преобразователя Холла InSb-GaAs ($E_{He^+}=200$ кэВ; $\Phi=6 \times 10^{18}$ ион/см²; состав химического травителя: HNO₃:40% винная кислота=1:3):

1- вытравленный элемент 3Д топологии; 2- клин травления; 3- антимонид индия (InSb); 4-арсенид галлия (GaAs)

На рисунке 6 приведены фотографии топологий первичных преобразователей Холла на гетероэпитаксиальных структурах InSb на GaAs, наглядно иллюстрирующих влияние состава химических травителей, приведенных в таблице, причем, образец *д* изготовлен с применением блистерингового порообразования имплантацией ионов гелия.

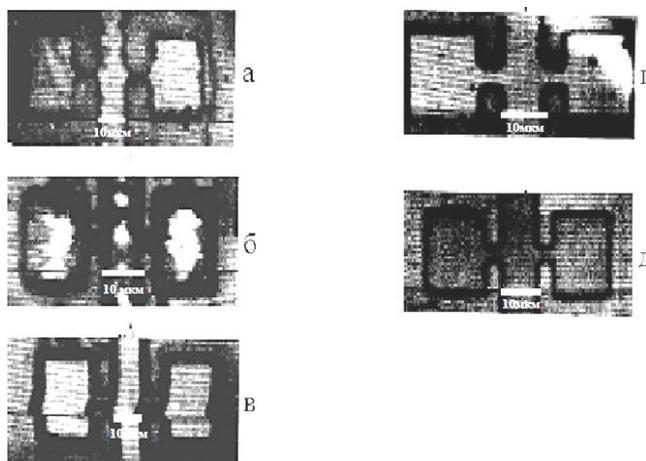


Рис.6. Фотографии топологии первичных преобразователей для датчика Холла.

3Д-топология получена методом ИЛМ He⁺ с последующим химическим травлением в режиме б (табл. 2): *а*- HNO₃:HF=1:1; *б*- HNO₃:HCl=1:1; *в*- H₂O₂:HF=1:1; *г*- HNO₃:40% винная кислота=1:3 ($T_T \sim 35$ °C); *д*- HNO₃:40% винная кислота=1:3 с предварительным облучением He⁺ в режиме E=200 кэВ, $\Phi=6 \cdot 10^{18}$ ион/см²

В результате последующего химического травления до подложки арсенида галлия с послойным контролем удельного сопротивления

формировались топологические элементы с отвесным краем вплоть до глубины ~ 2 мкм.

Полученные первичные полупроводниковые преобразователи для датчиков Холла с габаритными размерами $0,4 \times 0,4$ мм, имеют размеры области взаимодействия $0,01 \times 0,06$ мм и электрические параметры, приведенные на рисунке 7 [7].

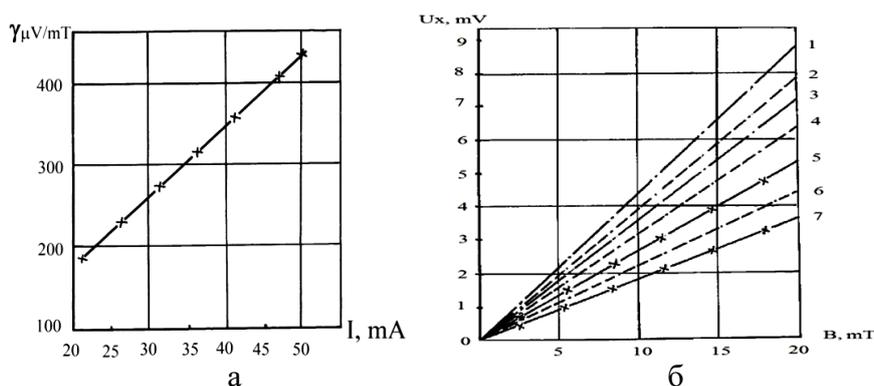


Рис. 7. Параметры первичных преобразователей датчиков Холла:
 а- зависимость магнитной чувствительности от управляющего тока;
 б- зависимость холловского напряжения от напряженности магнитного поля:
 1-50 мА; 2- 45 мА; 3- 40 мА; 4- 35 мА; 5- 30 мА; 6- 25 мА; 7- 21 мА

4. Заключение

1. Исследовано влияние радиационного блистеринга ($E=100-200$ кэВ, $\Phi=6 \cdot 10^{17}-6 \cdot 10^{18}$ ион/см²) на электрическое сопротивление, морфологию 3Д структуры антимида индия преобразователей Холла для твердотельной электроники.

2. Установлен режим ионно-ускоренного локального прецизионного химического травления пористого антимида индия с целью образования необходимого клина травления 3Д топологического рисунка. Он положен в основу технологии уменьшения остаточного напряжения датчиков Холла, используемых в твердотельной радиоаппаратуре СВЧ в качестве малоинерционных датчиков проходящей СВЧ-мощности, применяемых в диагностических системах научно-производственной фирмы «Диагностические технологии для техносферы (г. Москва) и научно-производственного предприятия «Техносфера-МЛ» (г. Зеленоград).

3. В результате на пластине структуры n-InSb-i-GaAs в одном процессе (групповым способом) получены 400 шт. первичных преобразователей Холла с величиной остаточного напряжения $\leq 0,05$ мВ. Выход годных составил 86%.

Литература

1. Donnelly S.E., Lucas A.A., Vigneron J.P., Rife J.C. Rad. Eff.78, 1982. – 337 p.
2. Griffioen C.C., Evans J.H., De Jong P.C., Van Veen A. Nucl. Instr. Meth. B., 1987. – 417 p.
3. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Радиационный блистеринг // Успехи физических наук. Москва: 1981. – Т. 135. – Вып. 4. – С.671-689.
4. Африканов И.Н., Гусев В.М., Гусева М.И., Мансурова А.Н., Мартыненко Ю.В., Морозов В.Н., Челноков О.И. Гелиевый блистеринг при больших дозах облучения // Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 3.- с. 14-26.
5. Перинская И.В., Перинский В.В. Полиморфные превращения в металлах, стимулированные ионно-лучевой обработкой // Технология металлов, 2012.- №9.- с. 45-49.
6. Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н. Модифицирование полупроводников пучками протонов // Физика и техника полупроводников, 2000. – Т. 34.- Вып.10.- с. 22-28.
7. Cato I., Shimada T., Komatsubare K.F. I.Appl. phys, 45.- 1974.- 1044 p.
8. Перинская И.В., Перинский В.В., Петрова Н.А. Свеллинг при ионной имплантации антимонида индия и коммерциализация формирования рельефа: сб. науч. тр. по итогам международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» / И.В. Перинская, В.В. Перинский, Н.А. Петрова// Брянск: БГИТА, 2013.- Вып. 17. - 80-83 с.

Для цитирования:

И. В. Перинская. Влияние радиационного блистеринга на электрическое сопротивление, морфологию 3Д структуры антимонида индия для преобразователей Холла. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/11/text.pdf>