УДК 621.794.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ РЕЗИСТОРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

Родионов И.В., Перинский В.В., Перинская И.В., Куц Л.Е.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, e-mail: kuts70@yandex.ru

Исследовано влияние облучения ионами гелия с ускоряющим напряжением 30–150 кВ и дозой 1,2–1,4 мкКл/см² для формирования областей изоляции и повторного внедрения ионов гелия с ускоряющим напряжением 30–150 кВ и дозой 6–12 мкКл/см² для получения электрически изолированных резисторов ИС СВЧ на арсениде галлия. Экспериментально получены зависимости сопротивления эпитаксиального арсенида галлия от ускоряющего напряжения ионов гелия, подтверждающие модель Линхарда – Шарфа – Шиотта для внедрения легких ионов, режимы ионов-лучевого (He⁺) модифицирования арсенида галлия для создания локальных изолирующих областей резисторов. Установленный режим ионно-лучевого модифицирования положен в основу технологии изготовления электрически изолированных резисторов с повышенной термостабильностью и необходимым пробивным напряжением локальных изолирующих слоев эпитаксиального арсенида галлия, что расширяет возможности при проектировании микросхем.

Ключевые слова: ионно-лучевое модифицирование, электрически изолированный резистор, термостабильность, пробивное напряжение

IMPROVEMENT OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ARSENIDE GALLIUM LAYERS OF THE RESISTORS OF INTEGRATED SCHEMES BY ION-RADIATION MODIFICATION

Rodionov I.V., Perinskiy V.V., Perinskaya I.V., Kuts L.E.

Saratov Yuri Gagarin State Technical University, Saratov, e-mail: kuts70@yandex.ru

Radiation influence by helium ions with acceleration voltage of 30-150 kV and a dose 1,2-1,4 mkKl/cm² for formation of areas of insulation and repeated implementation of ions of helium with acceleration voltage of 30-150 kV and a dose 6-12 mkKl/cm² for receiving electrically the very high frequencies integrated circuits isolated resistors on gallium arsenide is probed. The dependences of the resistance of epitaxial gallium arsenide on the accelerating voltage of helium ions, confirming the Linhard-Scharf-Schiot model for the introduction of light ions, the modes of ion-beam (He⁺) modification of gallium arsenide to create local isolating regions of resistors are obtained experimentally. The set mode of ion-ray modifying is the basis for manufacturing techniques electrically of isolated resistors with the increased heat stability and necessary puncture voltage of local insulation layers of epitaxial arsenide of gallium that expands opportunities in case of design of chips.

Keywords: ion-ray modifying, electrically isolated resistor, heat stability, puncture voltage

Важнейшим материалом микрокомпонентов монолитно-интегральных схем СВЧ является эпитаксиальный арсенид галлия (GaAs) с заданными электрофизическими характеристиками, одним из способов контролируемого создания которых является ионно-лучевое модифицирование (ИЛМ) [1, 2].

ИЛМ предъявляет многочисленные требования к параметрам эпитаксиального GaAs, непосредственно влияющим на электрофизические характеристики и морфологию полученных структур, на выполнение операций литографии и травления. К таким требованиям относятся: обработка поверхности пластин (не хуже 14 класса); поверхностная плотность точечных дефектов и дислокаций (менее 10² см⁻²); поверхностная плотность органических загрязнений (менее 10⁹ г/см²).

Особое место в характеристике эпитаксиального GaAs занимают параметры, определяемые примесным составом кристалла: удельное сопротивление (р), разброс р по площади пластины, стабильность р при термической и радиационной обработке, коэффициенты диффузии основных и фоновых примесей, степень перекомпенсации материала. Значения этих параметров зависят от методов изготовления GaAs. Исходный низкоомный GaAs с мелкими, частично компенсированными примесями может быть переведен в полуизолирующее состояние различными способами (рис. 1). Во-первых, возможна непосредственная компенсация мелких доноров путем введения глубоких акцепторных центров с концентрацией $N_{\rm AA} > N_{\rm II} - N_{\rm A} (N_{\rm AA}, N_{\rm II}, N_{\rm A}$ соответственно концентрации глубокого акцептора, мелкого донора).

При этом образуется материал с дырочной проводимостью. Во-вторых, возможна дальнейшая перекомпенсация глубокого ак-

цептора глубоким донорным уровнем $N_{\rm дд}$ в соотношении

$$N_{\rm ДД} + N_{\rm J} \succ N_{\rm AA} + N_{\rm A} \succ N_{\rm J}.$$

Особенность этого случая заключается не только в формировании высокоомного материала с электронной проводимостью, но и в большей температурной стабильности ρ , так как уровень Ферми E_f локализуется в энергетическом интервале $E_{AA} < E_c < E_{IIII}$.

в энергетическом интервале $E'_{AA} < E_j < E_{ДД}$. На рис. 1 представлена также схема получения полуизолирующего GaAs с инверсным расположением глубоких, уровней (акцепторный уровень расположен выше энергии ионизации донора), соответствующим энергетическим параметрам примесей кислорода и хрома – глубоких примесей, наиболее часто применяемых при изготовлении полуизолирующего GaAs. С хромом связывают глубокий акцепторный уровень E_{AA} + 0,69 эВ, либо E_{AA} + 0,79 эВ, кислороду приписывается донорный уровень $E_{ДД}$ – 0,75 эВ. Оптимальным является соотношение

$$N_{\rm AA} \sim N_{\rm AA} + N_{\rm A} - N_{\rm A}, N_{\rm AA} \geq N_{\rm A} - N_{\rm A}.$$

Для рассмотренной схемы с определенными допусками можно считать, что концентрация электронов, поставляемых в зону проводимости с глубокого донорного уровня, равна

$$\Delta n \sim \Delta N_{\rm JJI} \exp\left(-\frac{E_{\rm JJI}}{K_o T}\right),$$

$$\Delta N_{\rm AA} \sim N_{\rm AA} - \mathbf{K}_{\rm \Pi} N_{\rm A},$$
$$\mathbf{K}_{\rm \Pi} = \left(N_{\rm AA} + N_{\rm A} - N_{\rm A} \right) / N_{\rm A},$$

где К_п – степень перекомпенсации.

Так как *ρ*~(Δ*n*)⁻¹, для получения максимального удельного сопротивления необходимо увеличивать энергию ионизации доноров и уменьшать некомпенсированную долю примесей. При этом всегда выполняется соотношение n + p > 2ni и, вообще, ρ собственного полупроводника является теоретическим пределом р компенсированного полупроводника. Повышение р за счет снижения подвижности электронов (µ), как правило, нежелательно. Воспроизводимость параметров при раздельном легировании донорными и акцепторными примесями практически невозможна изза неточной дозировки лигатуры, различной сегрегации и – перераспределения примесей, но может быть достигнута при легировании соединениями стехиометрического состава с компонентами, проявляющими донорную и акцепторную электрическую активность с большими энергиями ионизации.

Отличительная особенность ионного легирования – возможность легирования объекта любыми (без ограничений) элементами, в том числе не имеющих растворимость в материале данного объекта. Именно это обстоятельство и способствовало широкому применению принципов ионной модификации структуры с целью управления химическими, физическими и механическими свойствами.



Рис. 1. Схема перевода п GaAs в полуизолирующий п-GaAs: прямое (а), инверсное (б): - нейтральная примесь, – • ионизированный акцептор, • – ионизированный донор

С целью изменения физико-механических свойств твердых тел используют облучение одного объекта несколькими типами ионов в различных их сочетаниях и последовательности в зависимости от целей ионной модификации. Так, для изменения физических свойств полупроводников используют последовательное облучение ионами инертного газа и соответствующих легирующих ионов [3, 4]. При этом выбор ионов инертного газа обусловлен необходимостью увеличить только количество радиационных дефектов при условии нейтральности самого иона к изменению физического свойства облучаемого полупроводника и отсутствия его химического взаимодействия, как с атомами полупроводника, так и с легирующими атомами. То есть основной недостаток в аналогичных способах облучения это то, что сами ионы инертного газа не используются для модификации свойств полупроводников. Также недостатками используемых способов ионного легирования являются: необходимость большого времени облучения для достижения заданных доз облучения при номинальных потоках ионов; высокие температуры (>0,5Т_{плав}) облучения или послерадиационного отжига, необходимые для формирования заданных по размеру и плотности дискретных выделений вторичной фазы; большая дисперсия выделений по размерам из-за флуктуационного механизма их одновременного зарождения и роста; невозможность обеспечить условия формирования строго заданного наномикронного размера и высокой объемной плотности выделений; трудности получения некогерентных (с резкой межфазной границей) выделений нанометрического размера в кристаллической решетке облучаемого объекта [5].

Наиболее удобными с практической точки зрения реализации предлагаемого способа являются атомы гелия (He⁺). Источники ионов He⁺ обладают высоким уровнем потока частиц, что позволяет эффективно за короткие времена достигать требуемых высоких (1–10 ат.%) концентраций атомов гелия в облучаемом объеме объекта. Более того, ионы He⁺ обладают большим проективным пробегом, что обеспечивает его внедрение в облучаемый объект на большие глубины.

Известно [6], что гелиевые поры в твердых телах могут зарождаться и расти даже при комнатной температуре облучения. При этом они формируют ансамбль пор с высокой (> 10¹⁷ см⁻³) плотностью и размерами в интервале 1–2 нм. При определенных условиях облучения они формируют в облучаемой матрице материала упорядоченную сверхрешетку нанопор, что обеспечивает их максимально возможную объемную плотность при минимальных размерах. В работах В.Ф. Реутова и С.Н. Дмитриева [5, 7] экспериментально было показано, что атомы гелия стимулируют перераспределение легирующих элементов в решетке материала, инициируют образование выделений, способствуют синтезу фаз, например нитрида бора, а их скопления в виде гелиевых пор эффективно геттерируют легирующие элементы.

Недостатками существующих резисторов ИС СВЧ на GaAs являются низкая термическая стабильность изготавливаемых резистивных слоев и недостаточное пробивное напряжение локальных изолирующих областей.

Цель работы заключалась в экспериментальной оптимизации режимов облучения ионами гелия, определении ускоряющего напряжения и дозы для формирования локальных областей изоляции и получения электрически изолированных резисторов в составе ИС СВЧ.

Материалы и методы исследования

Образцы представляли собой эпитаксиальные структуры арсенида галлия с толщиной эпитаксиального слоя $0,3\div0,4$ мкм и концентрацией электронов $2\cdot10^{16}$ см⁻³. Контактные площадки изготавливались методом вакуумного напыления алюминия толщиной 0,3 мкм с последующей фотолитографией по стандартной методике. Изолирующие области между контактными площадками создавались внедрением ионов гелия (He⁺) на установке ионного легирования типа «Везувий» в диапазоне ускоряющего напряжения $U_{\rm verk} = 30-150$ кВ и доз $\Phi = 1,2-1,4$ мкКл/см².

Результаты исследования и их обсуждение

Области резисторов выделялись формированием окон в фоторезистивной маске из ФП-383 толщиной 1 мкм и затем повторно внедрялись ионы гелия (He⁺) с ускоряющим напряжением $U_{\rm yek} = 30-150$ кВ и дозой $\Phi = 1,2-1,4$ мкКл/см² (рис. 2).

В результате получены резисторы с сопротивлением R = 320 Ом-380 Ом электрически изолированные от других резисторов в плоскости эпитаксиальной структуры слоем с удельным сопротивлением 10^6 Ом см (рис. 3).

Экспериментально полученные зависимости сопротивления эпитаксиального арсенида галлия от ускоряющего напряжения ионов гелия приведены на рис. 4 и подтверждают модель Линхарда – Шарфа – Шиотта (ЛШШ) для внедрения легких ионов (для них электронное торможение является преобладающим процессом, если $U_{\rm vec}$ в пределах 300 кВ).



Рис. 2. Эпитаксиальная структура арсенида галлия после формирования окон в фоторезистивной маске (а) и повторного внедрения ионов гелия (б), образующих собственно резисторы:
1 – полуизолирующая подложка; 2 – эпитаксиальный слой арсенида галлия; 3 – контактные площадки; 4 – области изоляции после внедрения ионов гелия; 5 – фоторезистивная маска; 6 – резистор, образованный после повторного внедрения ионов гелия



Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления эпитаксиального слоя арсенида галлия от дозы внедренных ионов гелия с ускоряющим напряжением: $\Delta - U_{yc\kappa} = 30 \ \kappa B; \ \bullet - U_{yc\kappa} = 150 \ \kappa B$



Рис. 4. Зависимость сопротивления от ускоряющего напряжения ионов гелия: **0** – область изоляции (Φ = 1,2 мкКл/см²); **Δ** – собственно сопротивление (Φ = 6 мкКл/см²)

Зная характер распределения вводимых облучением дефектов [1, 4], а также зависимость толщины нарушенного слоя от дозы ионов гелия (рис. 5), определены условия,

при которых в ограниченной по горизонтали области эпитаксиальной структуры арсенида галлия образуется слой с высокой плотностью радиационных дефектов.

Режимы внедрения ионов гелия				Величина электрического
для создания изолирующих областей		для получения резисторов		сопротивления*
Ф, мкКл/см ²	U _{ve} , кВ	Ф, мкКл/см ²	U _{ve} , KB	R, Ом
1,2	30	2	30	5,5.105
1,2	30	4	30	9·10 ³
1,2	30	6	30	360
1,2	30	8	30	320
1,2	30	3	150	8·10 ⁵
1,2	30	6	150	1.104
1,2	30	9	150	400
1,2	30	12	150	380
1,2	30	15	150	50

Экспериментально полученные режимы ИЛМ арсенида галлия ионами гелия для создания локальных изолирующих областей резисторов

П р и м е ч а н и е . *среднее значение номинала сопротивления; усреднение проведено для каждого режима по группе из 50 резисторов; разброс номинала по каждой группе не превышает ± 3 %.



Рис. 5. Зависимость толщины нарушенного слоя от дозы ионов гелия: $\Delta - U_{_{VCK}} = 150 \text{ кB}; \bullet - U_{_{VCK}} = 30 \text{ кB}$



Рис. 6. а – зависимость пробивного напряжения (V_{np}) изолирующего слоя от дозы (Φ) ионов гелия: $o - U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$, ток утечки $I_{ym} = 10 \, m\kappa A$, без дополнительной термообработки; $\Delta - U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$, ток утечки $I_{ym} = 10 \, m\kappa A$, термообработка +300 °C; б – зависимость пробивного напряжения (V_{pp}) резисторов от температуры отжига (время отжига 60 мин): $\Delta - U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$, $\Phi = 8 \, m\kappa K_{\Lambda}/cm^2$; $- U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$, $\Phi = 12 \, m\kappa K_{\Lambda}/cm^2$; $o - U_{yc\kappa} = 150 \, \kappa B$, $\Phi = 8 \, m\kappa K_{\Lambda}/cm^2$; $\Box - U_{yc\kappa} = 150 \, \kappa B$, $\Phi = 12 \, m\kappa K_{\Lambda}/cm^2$

Методом измерения вольт-фарадных характеристик и емкостной переходной спектроскопии имплантированных ионами гелия слоев GaAs найдены четыре ловушки электронов с энергией активации 0,79; 0,65; 0,32; 0,27 эВ, причем два наиболее глубоких

центра доминируют при высоких дозах облучения 8–12 мкКл /см².

Результаты экспериментов по влиянию дозы ионов и температурной обработки на параметры изолирующих областей резисторов представлены на рис. 6.



Рис. 7. а – зависимость пробивного напряжения (V_{np}) изолирующего слоя от дозы: Δ – ионов гелия (He⁺); $U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$; ток утечки $I_{ym} = 10 \, \kappa \kappa A$; \Box – ионов гелия (He⁺); $U_{yc\kappa} = 150 \, \kappa B$; ток утечки $I_{ym} = 10 \, \kappa \kappa A$; б – зависимость пробивного напряжения (V_{np}) резисторов, изготовленных: Δ – облучением ионами гелия; $U_{yc\kappa} = 30 \, \kappa B$; $\Phi = 12 \, \kappa \kappa \kappa \Lambda / c M^2$ от температуры отжига (время отжига 60 мин); \Box – облучением ионами гелия; $U_{yc\kappa} = 150 \, \kappa B$; $\Phi = 12 \, \kappa \kappa \kappa \Lambda / c M^2$ от температуры отжига (время отжига 60 мин)

Заметное возрастание пробивного напряжения областей арсенида галлия, подвергнутого имплантации ионов гелия, наблюдается при дозе ионов выше 0,4 мкКл/см². В интервале 0,2–0,8 мкКл/см² происходит монотонное увеличение $V_{\rm np}$ от исходного значения до 300 В (в зависимости от исходных параметров эпитаксиального слоя). В области $\Phi \ge 1,2-1,4$ мкКл/см² наклон дозовой зависимости уменьшается, зависимость стремится к насыщению с абсолютным значением сопротивления изолирующих областей 5×10⁵–10⁶ Ом (рис. 3, б).

Как следует из данных рис. 6, б, параметры полученных имплантацией ионов гелия изолирующих слоев термостабильны до температуры ~500 °С и практически не изменяются после часового отжига. При температуре 300 °С термообработка значительно увеличивает пробивное напряжение изолирующих областей арсенида галлия. Уместно предположить, что низкотемпературный отжиг приводит к распаду нестабильных радиационных нарушений, отжигу и миграции быстро диффундирующих дефектов на стоки.

Зависимость сопротивления и пробивного напряжения от дозы ионов гелия (рис. 7) позволяет предположить отжиг некоторых центров в запрещенной зоне арсенида галлия либо их комплексообразование.

Таким образом, исследовано влияние облучения ионами гелия с ускоряющим напряжением 30–150 кВ и дозой 1,2–1,4 мкКл/см² для формирования областей локальной изоляции и повторного внедрения ионов гелия с ускоряющим напряжением 30–150 кВ и дозой 6–12 мкКл/см² для получения электрически изолированных резисторов.

Заключение

Установленные режимы ионно-лучевого модифицирования положены в основу технологии изготовления электрически изолированных резисторов микросхем на арсениде галлия с высокой термостабильностью (до 500 °C) и высоким пробивным напряжением (до 450 В) изолирующих слоев арсенида галлия, что расширяет возможности при проектировании микросхем.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект № 11.1943.2017/ПЧ).

Список литературы

1. Перинская И.В. Ионно-лучевое конструирование материалов СВЧ микроэлектроники / И.В. Перинская, И.В. Родионов, В.В. Перинский. – Саратов: ИЦ «Наука», 2016. – 244 с.

онов, В.В. Перинский. – Саратов: ИЦ «Наука», 2016. – 244 с. 2. Перинская И.В. Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.Н. Лясников, В.В. Перинский. – Саратов: ИЦ «Наука», 2012. – 142 с.

3. Komarov F., Kamyshan A., Mironov A.M., Lagutin A.E., Martynov I.S. Formation of device isolation in GaAs with polyenergetic ion implantation // Vacuum. – 2001. – vol. 63. – P. 577–579.

 Ардышев М.В., Ардышев В.М., Крючков Ю.Ю. Накопление радиационных дефектов в арсениде галлия при импульсном и непрерывном облучении ионами // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – Вып. 3. – С. 313–315.

5. Реутов В.И. Формирование наноразмерных фаз в твердых телах при облучении многокомпонентными пучками ионов / В.И. Реутов, П.В. Горшков, Г.Г. Бондаренко, В.Ф. Реутов, В.Н. Логинов // Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине: труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов (19–20 ноября 2007г., г. Москва). – М.: Московский государственный университет, НИИЯФ МГУ, 2007. – С. 24–26.

 Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н. Модифицирование полупроводников пучками протонов / В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Ломасов // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып. 10. – С. 22–28. 7. Пат. 2193080 Российская Федерация, МПК

7. Пат. 2193080 Российская Федерация, МПК СЗОВЗ1/22, H01L21/265. Способ ионного легирования твердых тел / Реутов В.Ф., Дмитриев С.Н.; заявитель и патентообладатель Объединенный институт ядерных исследований. – заявл.05.04.2000; опубл. 20.11.2002. Бюл. № 32. – 3 с.