

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНЫХ $n^+ - p$ -ПЕРЕХОДОВ, СОЗДАНЫХ ЛЕГИРОВАНИЕМ АРСЕНИДА ИНДИЯ ИОНАМИ СЕРЫ

Герасименко Н. Н., Курышев Г. Л., Мясников А. М.,
Ободников В. И., Сафронов Л. Н., Хрящев Г. С.

Проведено сопоставление электрофизических свойств слоев проводимости n -типа, полученных имплантацией в арсенид индия ионов аргона и серы. Установлено, что при дозах $\Phi \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ электрическая активность серы проявляется, начиная с температуры отжига $\sim 300^\circ \text{C}$. Коэффициент использования серы при этом в интервале доз $5 \cdot 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ меняется от 0.3 до 0.04. Легированием ионами серы изготовлены планарные $n^+ - p$ -переходы на InAs. Проведены исследования электрофизических свойств изготовленных $n^+ - p$ -переходов в зависимости от температуры. Показано, что прямой ток является суммой двух компонентов — диффузионного и рекомбинационного.

При нулевом смещении при 77 К величина дифференциального сопротивления (R_d), умноженная на площадь $n^+ - p$ -перехода, достигает $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Зависимость R_d от температуры описывается в рамках генерационно-рекомбинационного механизма протекания тока.

При использовании методов ионной имплантации для создания в полупроводниках легированных областей в большинстве случаев необходимой технологической операцией является постимплантационный отжиг. Этот отжиг необходим, во-первых, для активации внедренной примеси, во-вторых, для устранения радиационных дефектов. В ряде случаев отжиг проводят в режимах, обеспечивающих диффузионную разгонку внедренной примеси, с целью выведения $n - p$ -перехода из области торможения ионов, где велика концентрация радиационных дефектов.

Очевидно, что режимы внедрения ионов и постимплантационного отжига следует выбирать такими, чтобы обеспечить максимально возможный коэффициент использования внедренной легирующей примеси.

Для узкозонных полупроводниковых соединений задачей установления факта активации примеси, введенной из ионного пучка, осложняется электрической активностью радиационных дефектов, которые всегда вводятся в полупроводники при легировании. Так, имплантация в арсенид индия p -типа ионов инертного газа — аргона приводит к инверсии типа проводимости. Эффективная концентрация электронов, достигающая величины $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (при 77 К), сохраняется до температур отжига $\sim 700^\circ \text{C}$ и связывается с электрической активностью радиационных дефектов в арсениде индия [1]. В публикациях, посвященных описанию создания $n^+ - p$ -переходов с помощью легирования InAs ионами серы (см., например, [2, 3]), предполагалось, что при активационном отжиге происходит именно химическое легирование полупроводника. Созданные диоды обладают выпрямляющими вольтамперными характеристиками (ВАХ), но их наличие не может служить прямым доказательством факта химического легирования, поскольку выпрямление происходит на барьере, возникающем между монокристаллическими и разупорядоченными вследствие ионного облучения областями арсенида индия [1].

Массы ионов аргона и серы близки, следовательно, набор и концентрация первичных дефектов, вводимых при облучении этими ионами, практически

тождественны, что позволяет путем сопоставления электрофизических свойств слоев арсенида индия, облученных этими ионами, выделить вклад химических доноров в образование слоев проводимости n -типа.

С этой целью часть пластин p -InAs ($p \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при 77 К), исходно легированных марганцем, облучалась ионами серы, а часть — ионами аргона. Энергия ионов составляла 250 кэВ при плотности тока не более 0.15 мкА/см^2 . Дозы варьировались от 10^{13} до 10^{16} см^{-2} . Облучение проводилось при комнатной температуре через защитную планку SiO_2 толщиной 80 нм. Затем из пластин вырезались образцы, которые отжигались при температурах в интервале 200—650 °С. Отжиг проводился в течение 30 мин в атмосфере азота. Тип проводимости и слоевая концентрация носителей заряда при 77 К определялись по методу Ван-дер-Пау.

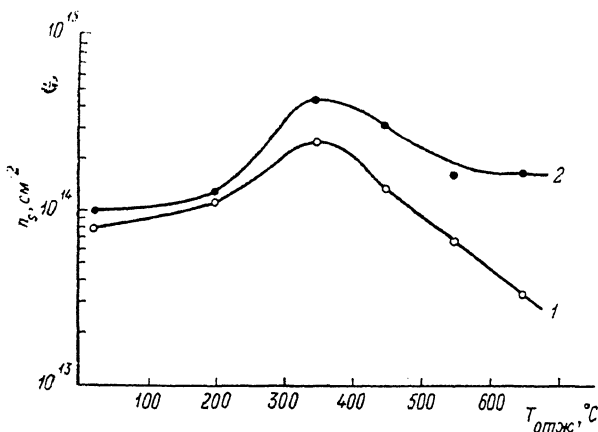


Рис. 1. Слое́вая концентрация электронов в слоях арсенида индия, облученных ионами Ar^+ (1) и S^+ (2), в зависимости от температуры отжига.

$\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E = 250 \text{ кэВ}$, $T_{\text{жиз}} = 77 \text{ К}$.

Измерения показали, что облучение ионами как Ar^+ , так и S^+ привело к инверсии проводимости облученных слоев в n -тип, причем если температура отжига была ниже 300 °С, то слоевая концентрация электронов в этих слоях практически не зависела от химической природы внедряемых ионов и для всех доз находилась в пределах $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

При $T_{\text{отж}} > 200 \text{ °C}$ происходит трансформация набора дефектных центров, введенных облучением, и изменяется концентрация электронов проводимости. Причем при $T_{\text{отж}} \sim 300 \text{ °C}$ независимо от вида внедренной примеси проявляется стадия так называемого обратного отжига, что отражается на увеличении слоевой концентрации электронов, а при $T_{\text{отж}} \sim 400 \text{ °C}$ часть дефектов, по видимому, диссоциирует (рис. 1). На этой же стадии наблюдается и проявление химических доноров (серы): концентрация электронов в слоях, содержащих серу, выше, чем в слоях арсенида индия, подвергнутых внедрению ионов аргона, т. е. содержащих только радиационные дефекты. Нетрудно видеть, что

Таблица 1

Слое́вая концентрация электрически активной серы и коэффициент использования для разных доз ($T_{\text{отж}} = 400 \text{ °C}$)

Φ , см^{-2}	N_S , см^{-2}	K , отн. ед.
$5 \cdot 10^{14}$	$1.4 \cdot 10^{14}$	0.28
$3 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{14}$	0.1
10^{16}	$3.8 \cdot 10^{14}$	0.038

Таблица 2

Параметры $n^+ - p$ -перехода в зависимости от температуры

T , К	β	I_0 , А
105	1.7	$4.2 \cdot 10^{-12}$
150	1.3	$7.2 \cdot 10^{-10}$
185	1.3	$4.3 \cdot 10^{-8}$

разность в слоевых концентрациях достигает величины $\sim 1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (для дозы $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) после отжига при 300°C и практически не меняется при более высоких температурах. Логично связать эту разность с активацией примеси на фоне отжига радиационных дефектов.

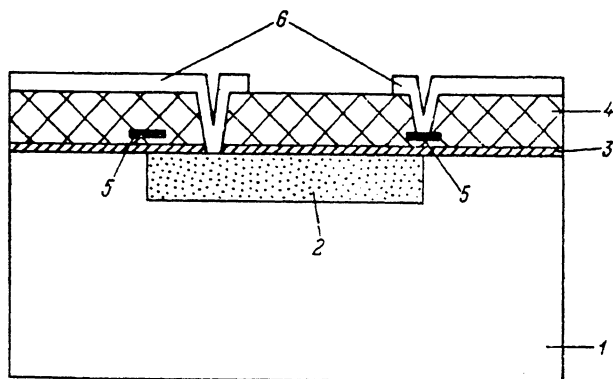


Рис. 2. Поперечное сечение диодной структуры.

1 — подложка p-типа, 2 — область, легированная ионами S^+ , 3 — анодный окисел, 4 — двуокись кремния, 5 — охранный электрод, 6 — разводка.

Увеличение дозы до 10^{16} см^{-2} (более чем на порядок) приводит к незначительному увеличению разности в слоевых концентрациях электронов в образцах, облученных ионами аргона и серы [до $(3 \div 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$], т. е. коэффициент использования серы снижается от 0.3 при $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до 0.04 при $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (табл. 1).

Необходимо отметить, что вклад электрически активной серы удается уверенно выделить только при дозах $\Phi > 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Поэтому мы не можем с достоверностью утверждать, что на малых дозах коэффициент использования серы стремится к 1, хотя этого следует ожидать в связи с большим пределом растворимости серы в арсениде индия ($> 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [4]).

Непосредственное сравнение профиля концентрации носителей заряда и профиля внедренной серы [5] показало, что коэффициент использования примеси при дозе $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ не превышает 0.1. Причем в данном случае коэффициент использования был оценен без разделения вклада в концентрацию носителей заряда электрически активных атомов серы и радиационных дефектов.

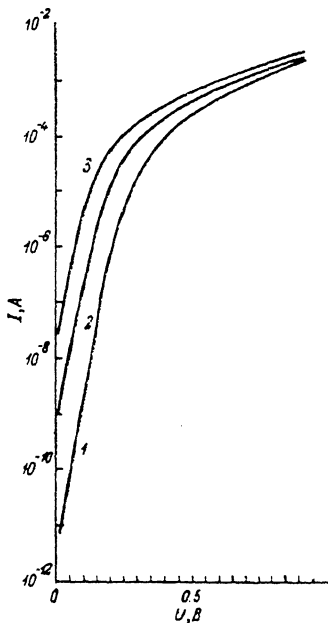


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ диодных структур на арсениде индия.

Измч, К: 1 — 105, 2 — 150, 3 — 185; $U_p = -15 \text{ В}$.

Приведенные результаты показали, что в наших условиях максимальный вклад электрически активных атомов серы в концентрацию электронов достигается при дозе $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При меньших дозах проводимость обусловлена радиационным разупорядочением решетки, а при больших — уменьшением коэффициента использования внедренной примеси, т. е. большая часть атомов серы уходит на образование комплексов с дефектами.

Исходя из результатов проведенных экспериментов при изготовлении планарных $n^+ - p$ -переходов, мы остановились на дозе ионов серы $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Облучение ионами S^+ с энергией 250 кэВ проводилось в окна размером 80×110 мкм, вскрытые в алюминиевой маске. После облучения и снятия алюминия на пластины наносился слой SiO_2 толщиной ~ 200 нм для защиты поверхности при отжиге, проводившемся при $450^\circ C$ в течение 30 мин. При более высоких температурах отжига арсенид индия теряет мышьяк [6], что может сказаться на свойствах границы раздела полупроводник—диэлектрик, а следовательно, и на качестве планарных $n^+ - p$ -переходов.

Поперечное сечение изготовленных диодов схематически показано на рис. 2.

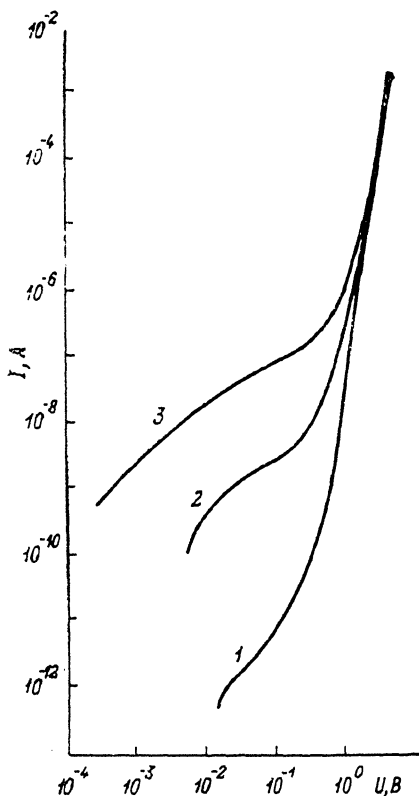


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ диодных структур на арсениде индия.

$T_{\text{отж}}, K$: 1 — 105, 2 — 150, 3 — 185; $U_g = -15$ В.

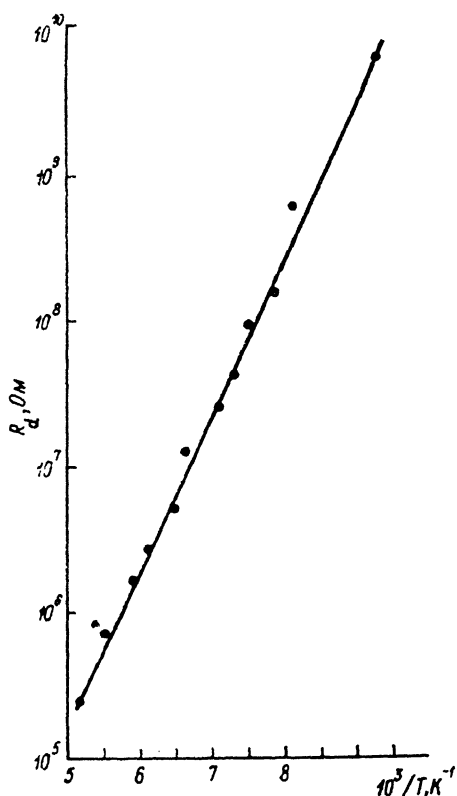


Рис. 5. Зависимость дифференциального сопротивления $n^+ - p$ -перехода при нулевом смещении от температуры.

Изготовленные диодные структуры помещались в криостат, позволяющий регулировать температуру в пределах $\sim 100 - 200$ К, и проводилось измерение ВАХ при различных напряжениях на охранном электроде, к которому прикладывался отрицательный потенциал (U_g) относительно базы.

Измерения показали, что в указанном температурном интервале с увеличением U_g как прямой, так и обратный токи снижаются, выходя на насыщение при $U_g = -15$ В. Полученные при $U_g = -15$ В ВАХ, снятые при различных температурах, приведены на рис. 3, 4.

Прямые ветви ВАХ на линейных в полулогарифмическом масштабе участках описываются выражением

$$I = I_0 (\exp(qU/\beta kT) - 1), \quad (1)$$

где q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — температура. Величины β и I_0 в зависимости от температуры сведены в табл. 2.

Полученные значения β свидетельствуют о том, что прямой ток определяется двумя механизмами — диффузионным и рекомбинационным [7]. С ростом температуры происходит возрастание диффузионного компонента тока относительно рекомбинационного, β уменьшается и стремится к 1. Такое поведение

ние естественно для $n^+ - p$ -перехода со смешанной проводимостью, так как диффузионный компонент I_0 пропорционален n_i^2 , а рекомбинационный — n_i (n_i — собственная концентрация носителей заряда) растет с температурой пропорционально $T^{3/2} \cdot \exp(-E_g/2kT)$ [7].

Здесь необходимо отметить, что полученное при 185 К значение β завышено из-за сопротивления базового материала и контактного сопротивления. Это видно на рис. 3, где на токе в прямой ветви ВАХ, снятой при 185 К, практически во всем измеряемом диапазоне сказывается последовательное сопротивление.

При приложении обратного напряжения пробой $n^+ - p$ -перехода происходит при $U > 2.5$ В (рис. 4).

На рис. 5 приведена зависимость дифференциального сопротивления $n^+ - p$ -перехода (R_d) при нулевом смещении от температуры. Измерения проведены при подаче на диодные структуры напряжения в пределах $-10 - +10$ мВ и подборе U_g так, чтобы обеспечить максимальные значения R_d .

Полученная в эксперименте зависимость R_d от температуры хорошо описывается в рамках генерационно-рекомбинационного тока через $n - p$ -переход:

$$R_d(T) = 2kT/qI_0(T) = 2kT\tau/q^2Wn_i(T), \quad (2)$$

где W — ширина области пространственного заряда, τ — время жизни неосновных носителей заряда. Выражение (2) получено из (1) разложением в ряд при малых U , $I_0 = qWn_i/\tau$ и $\beta = 2$.

При расчетах W предполагалось, что $n^+ - p$ -переход резкий, так как концентрация электронов в легированной ионами области значительно превышает концентрацию дырок в подложке ($n > 10^{18} \text{ см}^{-2}$), а из-за малого коэффициента диффузии серы в арсениде индия ($\sim 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$) [5] при выбранном режиме отжига не происходит существенного диффузионного размытия примесного профиля.

Путем варьирования параметра τ установлено, что при $\tau \sim 10^{-8}$ с расчет дает хорошее совпадение с экспериментальной зависимостью R_d от температуры.

Следует отметить, что описание температурной зависимости на основе генерационно-рекомбинационного механизма не противоречит ранее высказанному утверждению, что прямой ток является суммой двух компонентов — диффузионного и рекомбинационного. При малых напряжениях прямой ток определяется рекомбинационным механизмом. Диффузионный компонент скаывается с некоторого значения напряжения U на $n^+ - p$ -переходе, так как с ростом U он возрастает быстрее рекомбинационного ($I_{\text{диф}} \sim \exp(\alpha U)$, $I_{\text{рек}} \sim \exp(\alpha U/2)$ [7]).

Экстраполяция зависимости $R_d(T)$ в области низких температур дает при 77 К величину $\sim 10^{13}$ Ом ($R_d A \sim 10^9$ Ом·см², A — площадь диода). При непосредственном измерении при погружении диодной структуры в жидкий азот получено значение $R_d = (5-7) \cdot 10^{12}$ Ом, что хорошо согласуется с величиной, полученной экстраполяцией, и почти на 6 порядков превышает этот параметр у диодов, описанных в [3].

Таким образом, в работе проведено сопоставление электрофизических свойств слоев n -типа проводимости, полученных имплантацией в InAs ионов Ag^+ и S^+ . Выделен вклад электрически активной серы в образование n -областей. Установлено, что электрическая активность серы проявляется, начиная с температур отжига ~ 300 °С. С помощью легирования ионами серы изготовлены планарные $n^+ - p$ -переходы.

В заключение авторы выражают благодарность С. А. Сухих за облечение образцов, А. Ю. Суртаеву и В. Л. Плотникову за помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] Герасименко Н. Н., Мясников А. М., Нестеров А. А., Ободников В. И., Сафронов Л. Н., Хрящев Г. С. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 753—755.
- [2] McNally P. J. // Rad. Eff. 1970. V. 6. N 1-2. P. 149—153.

- [3] Акимченко И. П., Паншина Е. Г., Тихонова О. В., Фример Е. А. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 11. С. 2210—2215.
- [4] Schilman E. // Z. Naturforsch. 1956. Bd 11a. S. 463—472.
- [5] Кольцов Г. В., Крутенюк Ю. В., Бологов С. В., Борискина Л. В., Симонов А. Н., Фример Е. А. // Поверхность. 1983. № 8. С. 118—122.
- [6] Veresedyhazy R., Pecz V., Moizes I. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 94. P. K11—K12.
- [7] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 456 с.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Получена 24.11.1989
Принята к печати 6.03.1990