

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ СЕЛЕНОМ GaAs

Евгеньев С. Б., Лапкина И. А., Озеров Ю. П., Уфимцев В. Б.

Исследовано влияние ионной имплантации селена и послеимплантационного отжига на перераспределение серы, кислорода и углерода в поверхностном слое полуизолирующего арсенида галлия, полученного по методу Чохральского с жидкостной герметизацией. Показано, что упомянутые элементы в результате имплантации селена и отжига при 1123 К в течение 20 мин перераспределяются в тонком приповерхностном слое, причем между ними наблюдается взаимодействие, и на перераспределение рассматриваемых примесей влияют радиационные дефекты, возникающие в процессе имплантации.

В настоящее время наиболее перспективным способом формирования интегральных схем на основе полуизолирующего арсенида галлия является ионная имплантация. В качестве имплантируемой примеси, создающей в результате ее активации донорные центры, наиболее часто используется селен. Однако, несмотря на практическое использование селена и имеющиеся в литературе сведения [1, 2], еще недостаточно исследованы вопросы, связанные с влиянием процесса имплантации и послеимплантационного отжига на состояние и распределение неконтролируемых примесей, таких как сера, углерод, кислород, определяющих электрофизические свойства поверхностных слоев подложки, с их взаимодействием с имплантируемой примесью.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование поведения указанных примесей и их перераспределения при имплантации и послеимплантационном отжиге.

Исследовались пластины полуизолирующего арсенида галлия, полученного методом Чохральского с жидкостной герметизацией при давлении 30 атм из смеси стехиометрического состава. В качестве имплантирующей примеси использовали селен.

Предварительные исследования показали, что подложки диаметром 60 мм, вырезанные из такого кристалла, обладают достаточно высокой термостабильностью (70 %) при отжиге, режим которого соответствует режиму, необходимому для активации селена (1123 К, 20 мин), т. е. сохраняют свои полуизолирующие свойства ($\rho > 10^6$ Ом·см). Имплантация селена проводилась в полированные подложки, подвергнутые дополнительно химической полировке в $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 5 : 1 : 1$, через защитное покрытие Si_3N_4 толщиной 0.075 мкм, нанесенное плазмохимическим методом при температуре подложек 573–623 К, с энергией ионов 400 кэВ и дозой 10^{13} см⁻². Для уменьшения эффекта каналирования пучок ионов направлялся под углом 6–7 град к оси с малыми индексами. После имплантации слой Si_3N_4 стравливался в HF (15 мин), затем наносилось защитное покрытие Si_3N_4 толщиной 0.12 мкм и проводился отжиг по указанному режиму в реакторе с атмосферой проточного водорода, подвергнутого очистке с помощью палладиевого фильтра (точка росы –70 °С). После отжига защитное покрытие удалялось в HF. Для изучения электрофизических свойств поверхностных слоев исследуемых образцов измерялось удельное сопротивление и снимались профили концентрации носителей заряда. Удельное сопротивление измерялось методом Ван-дер-Пау с точностью ± 30 %. Индиевые контакты вплавлялись в поверхность образца в водородной среде

при 673 К в течение 30 мин. После сплавления контактов образцы последовательно обрабатывались в HCl (30 с), H₂O, в полирующем травителе H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O = 5 : 1 : 1 (30 с), в HCl (5 с) с тщательной промывкой в дистиллированной воде. В таблице приведены результаты измерений удельного сопротивления образцов до и после имплантации и отжига.

На установке Bounton с ртутным зондом методом снятия вольтфарадных характеристик измерялись профили концентрации носителей заряда с точностью + 15 %. Результаты измерений представлены на рис. 1. На рис. 1, а представлены профили концентрации носителей заряда, снятые на обратных (неимплантированных) сторонах подложки, а на рис. 1, б — на имплантированных. Из характера профилей, показанных на рис. 1, а, следует, что пластины GaAs

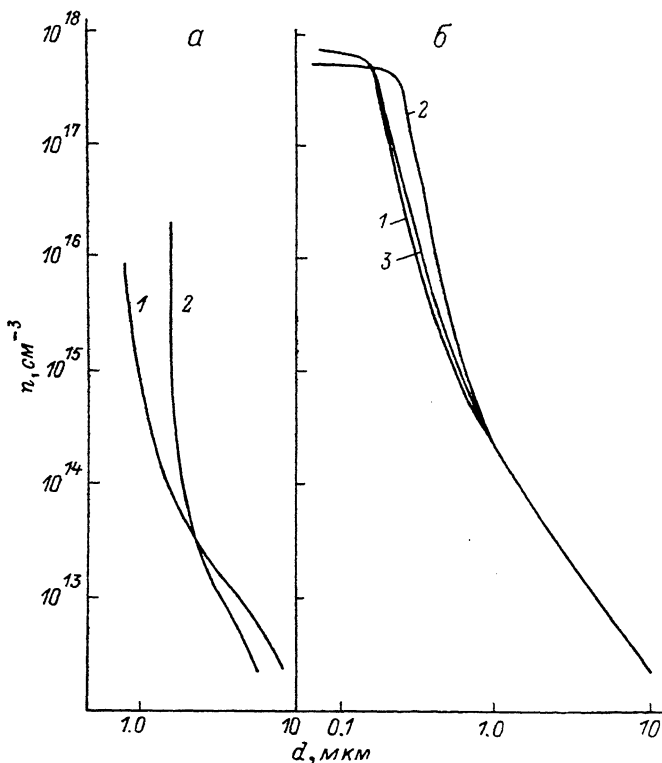


Рис. 1. Профили концентрации носителей заряда после отжига.
а — неимплантированная сторона, б — имплантированная селеном сторона.

являются термостабильными, т. е. не наблюдалось образования тонких приповерхностных слоев с высокой концентрацией носителей. Профили, приведенные на рис. 1, б, получены с помощью последовательного травления поверхностных слоев подложек сначала с помощью анодного травления (толщина травливаемого слоя 0.02—0.034 мкм), а затем в NH₄OH (0.02—0.17 мкм). После ряда травлений снимался весь имплантированный слой на подложке, что подтверждается сходством «хвостов» профилей на рис. 1, б с профилями неимплантированных сторон на рис. 1, а. Образец 2, отжигавшийся в течение 40 мин, по сравнению с остальными образцами имел профиль распределения концентрации носителей заряда (рис. 1, б), свидетельствующий о наличии более глубокого слоя с максимальной концентрацией носителей заряда. В остальных профилей всех образцов были однотипными.

Таким образом, из результатов измерения удельного сопротивления и полученных профилей концентрации носителей заряда следует, что при имплантации селена формируется проводящий слой с максимальной концентрацией носителей заряда $(5 \div 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, простирающийся в глубь подложки до 0.2 мкм.

Для изучения поведения примесей на различных стадиях процесса имплантации и отжига были получены концентрационные профили таких электроактивных примесей, как селен, кислород, углерод и сера.

Концентрационные профили примесей снимались на приборе JMS3F (Самса) при первичных ионах цезия. Скорость травления $0.02-0.03$ мкм/мин. Из-за отсутствия эталонов было невозможно количественно определить содержание примесей, и результаты даются в единицах интенсивности сигнала. Поэтому количественное сопоставление результатов рис. 2 невозможно, и по представленным данным можно судить лишь о перераспределении примесей после различных стадий имплантации. Величина регистрируемого сигнала индивидуальных элементов обусловлена работой выхода этого элемента при бомбардировке образца первичными ионами. Поэтому различие в величинах интенсивностей исследуемых элементов (рис. 2, в) можно объяснить изменением их состояния в матрице GaAs и, следовательно, работы выхода после различных стадий процесса имплантации. На рис. 2 представлены концентрационные профили селена, серы, углерода, кислорода для образца 3. На рис. 2, а изображены концентрационные профили примесей до проведения ионной имплантации. Видно, что обнаруживаются все три рассматриваемые неконтролируемые примеси. По-видимому, их наличие объясняется влиянием предшествующих эта-

Удельное сопротивление образцов до и после отжига

| № образца | ρ , Ом·см | |
|-----------|----------------|-------------------|
| | до отжига | после отжига |
| 1 | $2 \cdot 10^8$ | $2.66 \cdot 10^8$ |
| 2 | $2 \cdot 10^8$ | $3.20 \cdot 10^8$ |
| 3 | $2 \cdot 10^8$ | $4.50 \cdot 10^8$ |

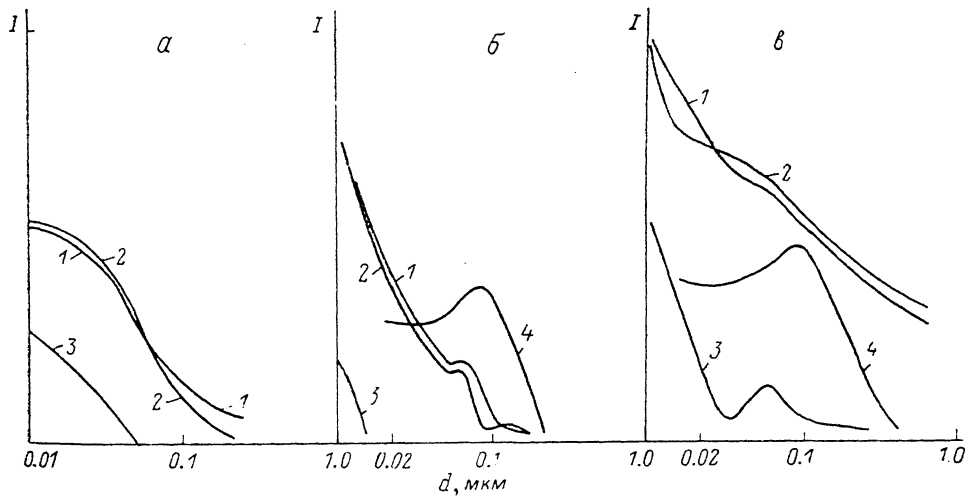


Рис. 2. Профили концентрации примесей на различных стадиях обработки образцов. а — исходные образцы, б — после имплантации селена, в — после имплантации селена и отжига; 1 — O, 2 — C, 3 — S, 4 — Se.

пов химико-механической обработки поверхности. Для всех этапов имплантации характерным является полное совпадение профилей кислорода и углерода как по виду, так и по соотношению интенсивностей, на основании чего можно сделать заключение о том, что эти элементы находятся в связанной форме. Если до проведения процесса имплантации содержание углерода и кислорода плавно уменьшается по мере удаления от поверхности подложки (рис. 2, а), то после имплантации селена на их профилях наблюдается излом на глубине $0.04-0.05$ мкм, смещенный относительно максимума на профиле распределения селена к поверхности подложки. Обращает на себя внимание то, что распределение селена по глубине подложки носит сложный характер: до глубины 0.03 мкм содержание его практически равномерно, на глубине 0.06 мкм наблюдается максимум, а затем до уровня фона на глубине 0.2 мкм — резкий спад.

Характер распределения селена в целом не меняется и после отжига: имеется площадка вблизи поверхности, максимум остается на той же глубине, но «хвост» простирается до глубины 0.4 мкм, по-видимому, за счет диффузии в процессе термообработки. Из рис. 2, в видно, что после отжига на кривых распределения кислорода и углерода излом размывается. Одновременно на той же глубине наблюдается скопление серы, которое выявляется максимумом на кривой ее распределения по глубине. Известно, что в процессе имплантации генерируются радиационные дефекты, максимум которых располагается ближе к поверхности, чем максимум на кривой распределения имплантированной примеси [3], поэтому формирование указанных максимумов, совпадающих по глубине и относящихся к С, О и S, скорее всего связано с генерированием в процессе ионной имплантации дефектов в приповерхностном слое, форма профиля которых в первом приближении описывается гауссовским распределением [4]. Размытие максимумов на профилях кислорода и углерода (рис. 2, в) и появление максимума на профиле серы после отжига связаны с диффузией примесей во время термообработок. Тот факт, что максимум серы появляется только после отжига, в то время как максимумы углерода и кислорода присутствуют уже после имплантации, свидетельствует о большей энергии активации диффузии в случае серы. Согласно имеющимся в литературе сведениям [5], на процесс перераспределения примесей может влиять также взаимодействие между ними, на что указывает уже упомянутое выше совпадение профилей углерода и кислорода.

Из представленных результатов следует, что для получения требуемого профиля распределения концентрации носителей заряда по глубине необходимо учитывать следующее: при активации имплантированной примеси ее распределение достаточно хорошо соответствует профилю распределения концентрации носителей заряда, что говорит о высокой степени активации, поэтому существенную роль может играть диффузия имплантированной примеси при изменении времени активирующего отжига. Необходимо также учитывать перераспределение таких неконтролируемых электроактивных примесей, как С, О, S, стимулируемое радиационными дефектами, возникающими в процессе имплантации, а также возможное взаимодействие между ними.

Список литературы

- [1] Sukhdev J. S., Gill S., Scaly B. I. // J. Electrochem. Soc. Sol. St. Sci. Tehn. 1986. V. 133. N 12. P. 2590—2596.
- [2] Столт К. А. // Полуизолирующие соединения A^3B^5 . М., 1984. С. 82—88.
- [3] Biesack I. J., Ziegler J. F. The stopping a. ranges of ions matter. N. Y., 1985. V. 1.
- [4] Jounson W. S., Gibbons J. E. Producted Range Statistic in semiconductors related Materials. Stroudsburg, 1975. 525 p.
- [5] Йодер М. Н. // Полуизолирующие соединения A^3B^5 . М., 1984. С. 188—193.

Московский институт
тонкой химической технологии
им. М. В. Ломоносова

Получена 31.10.1988
Принята к печати 7.03.1989