

04;06;11;12

Микролегирование приповерхностных слоев арсенида галлия ионами водорода

© В.В. Анисимов, В.П. Демкин, И.А. Квинт,
С.В. Мельничук, Б.С. Семухин

Томский государственный университет
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 16 ноября 1999 г.

Предлагается метод микролегирования приповерхностных слоев полупроводников ионами водорода с использованием плазменно-пучкового разряда. Проведенный эксперимент на арсениде галлия показал, что данный метод является эффективным по сравнению с известными способами модифицирования приповерхностных слоев.

Приповерхностное ионное микролегирование полупроводников используется для создания материалов с микрокомпозиционной структурой, обладающих новыми свойствами.

Низкотемпературное ионное насыщение приповерхностных слоев материала сопровождается миграцией в глубь материала значительного количества ионов и их низкотемпературным связыванием в приповерхностной области [1]. В качестве легирующих элементов выступают самые различные ионы, но одним из самых распространенных является ион водорода (H^+). Существует несколько способов его внедрения: наводораживание, имплантирование и микролегирование (протонирование) [2].

Среди способов микролегирования наиболее распространенным является метод мощных ионных пучков [2]. Однако это довольно трудоемкий и дорогой метод обработки поверхностей. Кроме того, в ряде случаев, когда необходима высокая чистота эксперимента (высокий вакуум, отсутствие примесей и т.п.), этот способ дает неудовлетворительные результаты.

Нами предлагается метод плазменной обработки поверхности материала. Плазма является хорошим источником ионов, которые образуются за счет плазмохимических процессов. Наиболее подходящим

источником такой плазмы является плазмохимический реактор [3], в котором используется высоковольтный разряд.

Хорошо известно, что высоковольтные импульсные разряды характеризуются наличием в плазме группы быстрых электронов с энергией, близкой к величине приложенного к электродам напряжения [4].

Создавая узкий разрядный промежуток с сетчатым анодом, можно получить пучок быстрых электронов, который создает значительную концентрацию ионов.

В качестве рабочей газовой смеси плазмохимического реактора мы выбрали смесь He и H₂. Наличие буферного газа гелия обеспечивает высокую энергетику электронов пучка, что позволяет транспортировать ионы (H⁺) на макроскопические расстояния (порядка нескольких сантиметров) от анода [5]. Взаимодействуя с поверхностью мишени, протоны при их достаточной концентрации способны эффективно насыщать приповерхностные слои материала мишени. Чтобы создать необходимую концентрацию протонов около поверхности мишени, требуется подобрать параметры разряда и состав газовой смеси He:H₂.

В связи с этим целью данной работы являлось спектральное исследование параметров высоковольтного плазменно-пучкового разряда для определения интервала условий, необходимых для оптимального насыщения приповерхностных слоев полупроводникового материала арсенида галлия (GaAs).

Соотношение концентраций He и H₂ в газовой смеси подбиралось, исходя из получения максимальной интенсивности свечения ионных линий He и атомных линий H с высоковозбужденных состояний.

Результаты эксперимента показали, что в газовой смеси He + H₂ с общим давлением $P = 9 \text{ Torr}$ при соотношении He:H₂ = 8:1 оптимальные условия для протонирования соответствуют следующим параметрам разряда: амплитуда импульса напряжения, подаваемая на ускоряющий зазор $d = 0.9 \text{ mm}$, $U_0 = 2 \text{ kV}$; длительность импульсов $\tau = 2 \mu\text{s}$ и их частота $f = 2.5 \text{ kHz}$.

Оценка концентрации ионов атома водорода H⁺ проводилась на основании спектроскопических измерений интенсивностей линий He и He⁺ на различных расстояниях от сетчатого анода и сравнения их с результатами расчетов деградационных спектров электронного пучка в He-H₂ плазме [6].

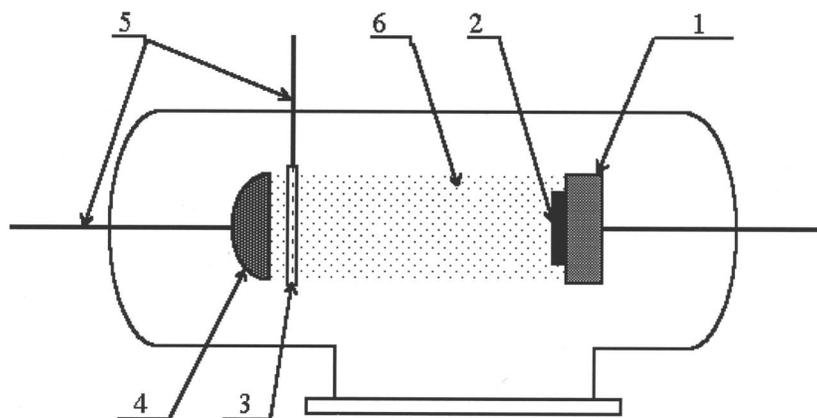


Рис. 1. Газоразрядный источник: 1 — образец, 2 — предметный столик, 3 — сетчатый анод, 4 — катод, 5 — токоподводящие электроды, 6 — плазменный факел.

Оказалось, что концентрация ионов водорода в факеле при данных условиях разряда составляет $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, обеспечивая поток этих ионов на поверхность мишени $10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для проведения экспериментов по протонированию GaAs образец (1) закреплялся на предметном столике (2) и помещался в газоразрядный источник на расстоянии 15 mm от сетчатого анода (3) (рис. 1).

Обработка ионами водорода материала GaAs проводилась для трех значений экспозиции: $\Delta t = 1, 2$ и 7 min.

Исследование поверхности GaAs после обработки проводили с помощью оптической микроскопии и методом рентгеновской дифрактометрии.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности необработанного (a) и обработанного в течение 1 min (b), 2 min (c) и 7 min (d) образца GaAs плазмой (увеличение $\times 1000$). Из рис. 2, b видно, что после плазменной обработки в течение одной минуты изменения в контрасте оптического изображения не наблюдается. После 2 и 7 min обработки на рис. 2, c, d видно, что протонирование приводит к образованию блоков, равномерно распределенных по поверхности. Размеры блоков различны

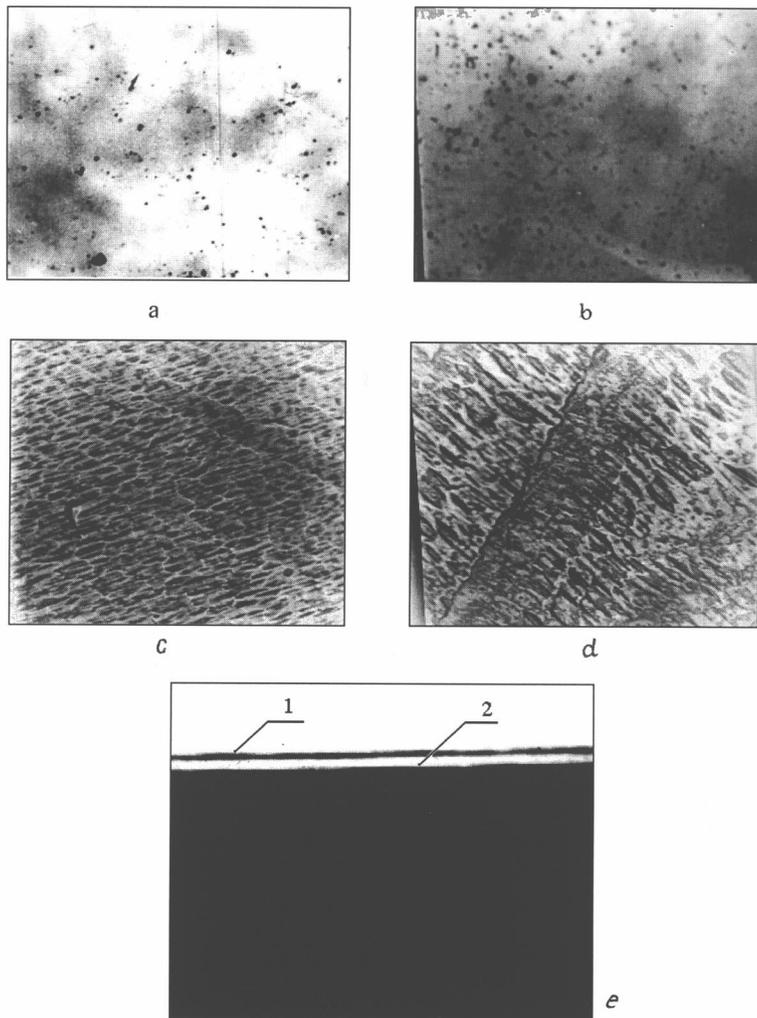


Рис. 2. Фотографии поверхности необработанного (*a*), обработанного в течение $\Delta t = 1 \text{ min}$ (*b*), $\Delta t = 2 \text{ min}$ (*c*) и $\Delta t = 7 \text{ min}$ (*d*) GaAs (увеличение $\times 1000$); *e* — вид сбоку (негатив): 1 — слой блоков, образовавшихся в результате протонирования; 2 — матрица GaAs.

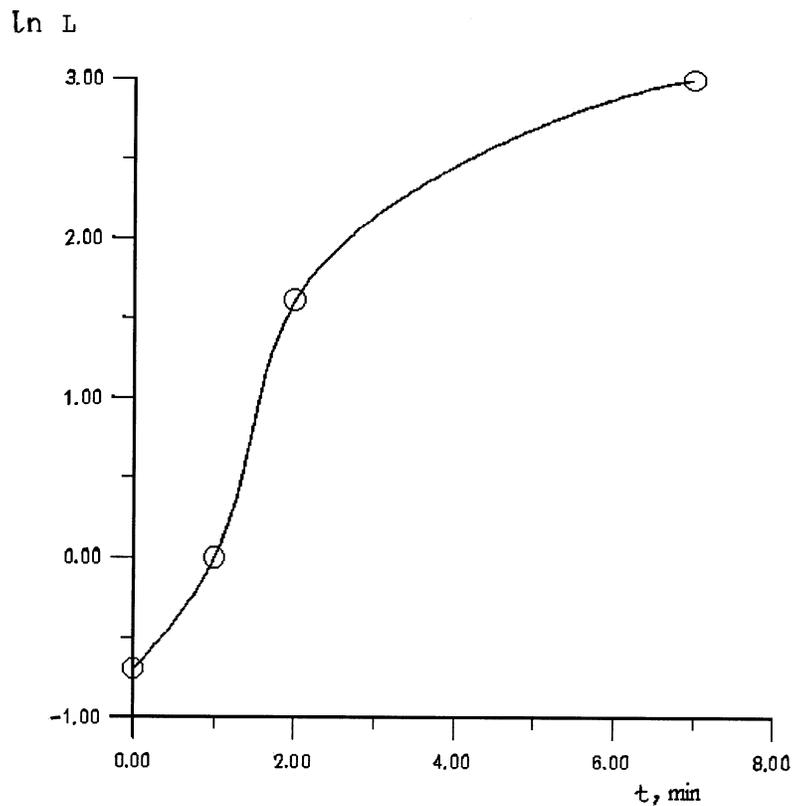


Рис. 3. Зависимость \ln размера блоков (L) GaAs (100) от времени.

для этих режимов: в случае 2 min они не превышают $5 \mu\text{m}$, а в случае 7 min они достигают $20 \mu\text{m}$. На рис. 2, *e* приведена фотография боковой поверхности (с торца) GaAs. Установлено, что слой (1) образовавшихся в результате протонирования блоков отделен от матрицы (2) резкой инвариантной границей, а его размеры около $6 \mu\text{m}$. На рис. 3 приведен график зависимости \ln размера блоков (L) от времени. Видно, что зависимость стремится выйти на равновесие уже после 2 min обработки GaAs.

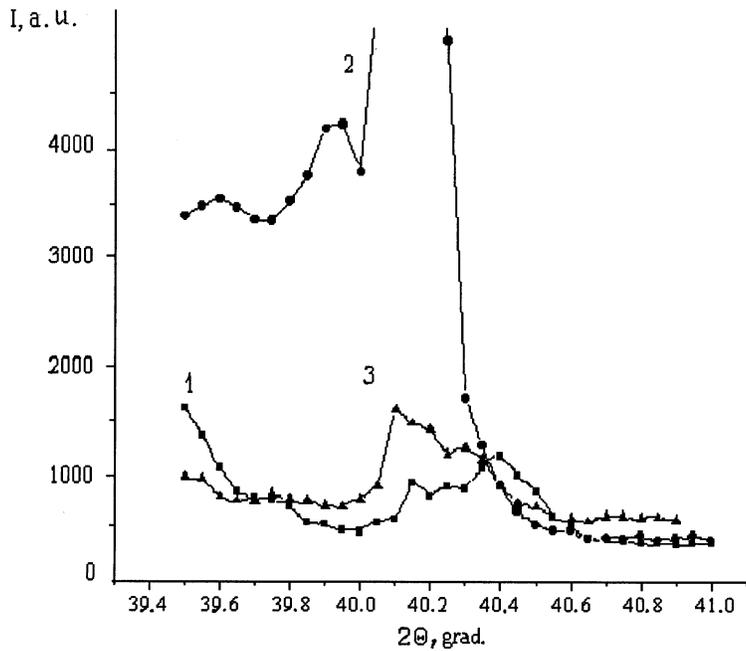


Рис. 4. Зависимость интегральной интенсивности I рефлекса (200) от брэгговского угла- 2θ рассеяния: 1 — исходный, 2 — время экспозиции $\Delta t = 2$ min, 3 — время экспозиции $\Delta t = 7$ min.

На рис. 4 представлены фрагменты рентгеновской дефектограммы GaAs (зависимость интегральной интенсивности I рефлекса (200) от брэгговского угла- 2θ рассеяния) после различных времен обработки. Видно, что интегральная интенсивность рефлекса (200) после 2 min воздействия в 4–5 раз увеличивается, причем исходный рефлекс и тот, который наблюдается после 7 min, имеют сложное строение, а после 2 min — гладкое, хорошо описываемое функцией Гаусса. Полученные результаты указывают на то, что уже после 2 min протонирования поверхностный слой (10–15 μm) улучшает свои кристаллические свойства по сравнению с исходным, хотя исходная поверхность была полированной поверхностью монокристалла (100).

Размеры блоков в GaAs после протонирования

Образец	$D, \text{Å}$
Исходный	344
	420
	631
2 min обработки	420
7 min обработки	344
	473

Такое перераспределение интенсивности может свидетельствует об образовании ряда различных по величине блоков D -областей когерентного рассеяния при протонировании. В таблице приведены результаты измерений размеров блоков (D) по известной методике Уоррена [7]. Видно, что после 2 min обработки образуются блоки с размерами 400 Å, а после 7 уже с размерами 250 и 340 Å. По сравнению с исходной структура стала более однородной и "идеальной".

В итоге проведенные измерения показали, что модифицирование структуры материала выражается в образовании приповерхностного слоя, отличающегося однородной блочной структурой на различных структурных уровнях.

Для подтверждения модификации материала ионами водорода нами были проведены аналогичные эксперименты в чистых газах He и H₂. Результаты микроскопических измерений показали, что в He эффект модификации отсутствует, а в водороде наблюдается положительный эффект. Однако в чистой водородной плазме значительно ухудшаются пучковые свойства электронов, что требует увеличения времени экспозиции при обработке материала.

Таким образом, использование He–H₂ пучковой плазмы как источника ионов водорода и доставки их на поверхность обрабатываемых материалов не требует сложных и технологических решений и вместе с тем обладает значительной эффективностью физических процессов в ионообразовании. Эти качества позволяют использовать данный тип плазмы при создании простых технологических устройств для модифицирования материалов.

Список литературы

- [1] *Сергеев А.Н., Ремнев Г.Е., Руднев С.В.* Тонкослойное протонно-ионное модифицирование. Томск: Изд-во Томского университета, 1993. 417 с.
- [2] *Davis H.A., Remnev G.E., Stinnett R.W., Yatsui K.* // Intense Ion-Beam Treatment of Materials. MRS BULLETIN. August, 1996. P. 58–62.
- [3] *Karelin A.V., Demkin V.P., Melnichuk S.V.* // International Conference on LASERS'96. 1996. P. 653–657.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1997. 592 с.
- [5] *Демкин В.П., Мельничук С.В., Муравьев И.И.* // Оптика атмосферы и океана. 1993. № 3. С. 253–257.
- [6] *Демкин В.П., Купчинский Н.Л.* // Процессы ионизации с учетом возбужденных атомов. Л. 1988. С. 168–169.
- [7] *Warren B.E.* // Phys. Rev. 1941. V. 59. N 9. P. 693–698.