

02;05;10

Визуализация области проецированного пробега ионов Ar при облучении GaAs

© В.М. Бусов, Г.Б. Венус, Г.М. Гусинский,
Н.Д. Ильинская, В.О. Найденов, А.А. Пастернак,
Е.Л. Портной, С.И. Трошков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 29 сентября 1999 г.

Приведены результаты экспериментального исследования с помощью растрового электронного микроскопа скола образца GaAs, облученного ионами Ar, ускоренными до энергии 2.1, 4.6 и 8.4 MeV.

Визуализация области пробега ионов, полученная в эксперименте, используется для определения проецированного пробега ионов в полупроводнике.

В настоящее время большой интерес представляют исследования, связанные со взаимодействием тяжелых ионов в диапазоне энергий $10^2 - 10^4$ keV с твердым телом.

В первую очередь это связано с перспективами развития микро- и нанотехнологий, *3d*-технологий, неразрушающих методов анализа. Программы таких исследований существуют на всех крупных ускорителях тяжелых ионов. Основные физические процессы, происходящие при взаимодействии тяжелых ионов большой энергии с твердым телом (кристаллами, аморфными веществами, металлами и т.п.), в значительной степени поняты [1–3]. Однако для уже упомянутых технологических целей применительно к конкретным твердотельным структурам требуется гораздо более углубленное знание процессов. В частности, модификация многослойных полупроводниковых структур пучками ускоренных тяжелых ионов требует точного определения тормозных потерь, проецированного пробега и стретглингов (продольного и бокового разброса) тяжелых ионов в полупроводниковых материалах.

Второй важный аспект исследования тормозной способности тяжелых ионов связан с изучением структуры ядер, а именно времен жизни их возбужденных состояний [4], в частности интенсивно исследуемых в последние годы полос высокоспиновых ядерных уровней, связанных

с явлением супердеформации [5]. Дело в том, что большинство ядерных уровней характеризуются значениями времен жизни порядка 10^{-14} – 10^{-11} с и основным методом их измерения является анализ форм гамма-линий, испущенных возбужденными в результате ядерной реакции ядрами отдачи и искаженных эффектом Доплера [6]. Поскольку мерой времени в этом методе является характеристическое время торможения ядер отдачи в веществе мишени, достоверная информация о тормозных потерях тяжелых ионов (ядер отдачи) напрямую связана с точностью измерения времен жизни.

В качестве теоретических оценок электронной и ядерной составляющих тормозной способности, а также пробега, стрегглинга в настоящее время обычно используют таблицы [1] или эквивалентную программу TRIM. Известно, в частности, что с ростом начальной скорости тяжелых ионов электронные тормозные потери сначала линейно возрастают, потом, при некотором "критическом" значении скорости (порядка 1–3% c), переходят на колокообразную кривую, а затем падают по мере дальнейшего роста скорости. Если для относительно высоких энергий тяжелых ионов точность таблиц [1] составляет 10–15%, то в области линейного роста отличия могут быть гораздо больше [7,8], что, скорее всего, связано с неточностью [9] теоретических оценок величины критической скорости [10], лежащих в основе таблиц [1]. Наибольшие неопределенности возникают при расчетах стрегглинга: по данным авторов [1], ошибка для легких ионов может составлять $\pm 20\%$, а для тяжелых ионов — 200%.

Следует отметить, что во многих случаях экспериментальные данные получены именно доплеровскими методами гамма-спектроскопии [11,12]. В этих условиях любые новые подходы к измерению пробегов и тормозных способностей тяжелых ионов в различных средах актуальны как для фундаментальной, так и для прикладной физики.

Нами предлагается сравнительно простой способ определения проецированного пробега и тормозных потерь тяжелых ионов в полупроводниках. Этот способ основан на том, что для образцов некоторых полупроводников, облученных тяжелыми ионами, с энергией несколько MeV с дозой 10^{11} – 10^{13} см², наблюдаемое в РЭМ (растровом электронном микроскопе) изображение во вторичных электронах имеет различную яркость в пределах пробега тяжелых ионов и вне этой области. В проведенной серии экспериментов в качестве мишени была использована структура GaAs. Использовалась тщательно подготовленная

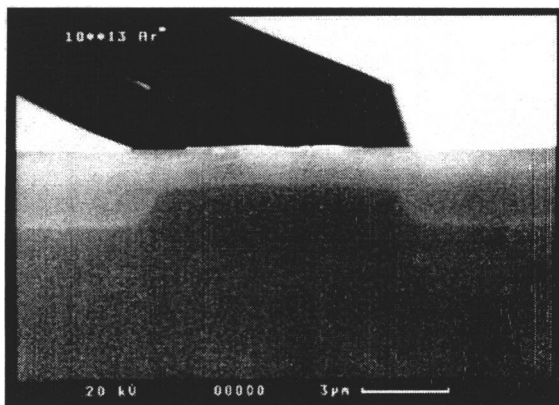


Рис. 1.

поверхность с нанесенными в качестве маски полосками фоторезиста, подвергнутая затем облучению ионами Ar с энергиями 2.1, 4.6 и 8.4 MeV.

На фотографии (рис. 1) представлен зеркальный скол образца GaAs с нанесенным фоторезистом. Образец облучен ионами аргона дозой $10^{13}/\text{cm}^2$, ускоренными до энергии 4.56 MeV. Отчетливо видно, что под полоской фоторезиста (маской) глубина проникновения ионов меньше, чем под открытой поверхностью. Таким образом, оказывается возможной фиксация пробега ионов, потери энергии в фоторезисте и области ядерных потерь. Представленная фотография сделана с помощью РЭМ (CamScan S4-90FE) во вторичных электронах при энергии зондирующего пучка 20 keV.

Обработка полученных в серии экспериментов результатов показывает, что величина контраста сильно зависит от типа иона и дозы облучения. Для ионов аргона контраст между модифицированной и немодифицированной областями наблюдался при дозах облучения более $5 \cdot 10^{11} 1/\text{cm}^2$ и связан с различием в спектрах вторичной электронной эмиссии этих областей.

На рис. 2 приведены полученные нами результаты для 3 значений энергий ионов Ar. Измеренный пробег ионов превышает рассчитанный по программе TRIM(ZB), имея примерно одинаковый продольный стретглинг (приведенные "усы" отражают величину стретглинга). На

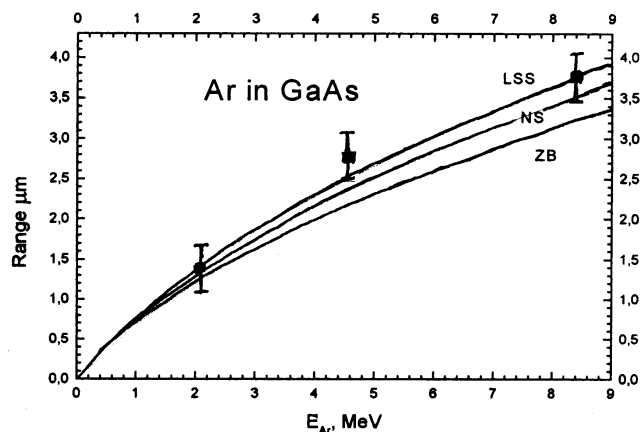


Рис. 2.

рисунок приведены также результаты сравнения с известными таблицами [2] (NS) с дополнительным учетом разницы между проектированным и полным пробегами (в этих таблицах приведены только пробеги вдоль трека) и теорией Линдхарда [3] (LSS). Ядерные потери во всех трех случаях полагались одинаковыми и соответствующими универсальному потенциалу, принятому в [1].

Можно предположить, что развитие предложенной методики позволит реализовать достаточно простой метод определения тормозных потерь и пробегов тяжелых ионов в полупроводниковых материалах в широкой области энергий.

Работа выполнена в рамках проекта 99–200036 МНТП России "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] Ziegler F., Biersack J., Littmark U. The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter. Pergamon, N.Y., 1985. Vol. 1.
- [2] Northcliffe L.C., Shilling R.F. // Nucl. Data Tables. A7. N 3–4. 1970.
- [3] Lindhard I., Sharff M., Schiott H.E. // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1963. V. 33. N 14. P. 1–42.

- [4] *Зобов А.Е., Лемберг И.Х., Пастернак А.А.* // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1990. Т. 54. С. 998.
- [5] *Rzaca-Urban T., Pasternak A.A., Lieder R.* et al. // Nucl. Phys. A. (In press).
- [6] *Лемберг И.Х., Пастернак А.А.* Современные методы гамма-спектроскопии. Л., 1985. С. 3–63.
- [7] *Lobach Yu.N., Pasternak A.A., Srebrny J.* et al. // Acta Phys. Polonica. 1999. В 30. Р. 234–243.
- [8] *Arstila K., Keinonen J., Tikkanen P.* // Metals. NIM. B101. 1995. Р. 321–326.
- [9] *Arstila A., Keinonen J., Tikkanen P.* // Phys. Rev. 1990. В 41. Р. 6117.
- [10] *Brand W., Kitagawa M.* // Phys. Rev. 1982. V. B25. Р. 5631.
- [11] *Lemberg I.K., Pasternak A.A.* // Nucl. Instrum. & Methods. 1977. V. 140. Р. 71–80.
- [12] *Antilla A., Branderburg S., Keinonen I., Bister M.* // Nucl. Phys. 1980. V. A334. Р. 205–216.