

Распыление полупроводников ионами высоких энергий

Б. Мерзук,* Д. К. Миннебаев, А. А. Шемухин, Ю. В. Балакшин
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 17.04.2019; Подписана в печать 18.04.2019)

В данной статье рассматривается такое явление, как распыление: его применение, история и свойства. Неотъемлемой частью описания распыления является теория Зигмунда, которая на данный момент считается основной в области распыления, так как она учитывает наибольшее количество нюансов ионного распыления. Она гласит, что коэффициент ионного распыления Y пропорционален косинусу угла распыления Θ в степени n , который в свою очередь зависит от массы и заряда. То есть теоретически он должен возрастать с увеличением энергии налетающих частиц. При энергиях порядка 10 кэВ теория выполнялась, однако эксперименты, проведенные при более высоких энергиях (80, 200, 250 и 300 кэВ), продемонстрировали, что это не так, и в области 200–250 кэВ имеется значительный провал значения этого коэффициента.

PACS: 68.49.Sf, 79.20.Rf

УДК: 539.1.09.

Ключевые слова: распыление, германий, кварцевый генератор, полупроводники.

ВВЕДЕНИЕ

После открытия В. Р. Гроувом распыления [1] в 1952 г. стало понятно, что напыление приводит к изменению многочисленных свойств поверхности. Далее выяснилось, что при взаимодействии частиц с твердым телом возникает множество физических процессов, таких как ионная имплантация [2–4], люминесценция, рентгеновское излучение, зарядовые обмены, которые оказывают большое влияние на вещество. В частности, возникает такое явление, как распыление — эмиссия атомов с поверхности твердого тела при его бомбардировке тяжёлыми заряженными или нейтральными частицами.

Сейчас это очень актуальная тема для исследования наноструктур, в микроэлектронном производстве для напыления и исследования тонких пленок [5] и травления рельефа, в получении атомарно чистых поверхностей, для исследования поверхностей [6]. Также например, для исследования структур графена (который обладает свойством самовосстановления [7]) и его свойств, которые меняются под действием ионных пучков: имплантация [8], очистка поверхности [9], изменение его магнитных свойств [10,11] и не только.

Основной проблемой всех вышеперечисленных процессов является то, что фундаментальный закон распыления не изучен до конца и имеет огрехи, так как не во всех областях энергий он выполняется одинаково.

Для описания ионного распыления применяется распространенная теория Зигмунда [12], основанная на решении кинетического уравнения Больцмана со следующими допущениями [13,14]:

- каскад столкновений, возникающий в результате

передачи энергии ионного пучка с атомом мишени является:

- изотропным по направлениям;
- передвижение атомов первичных атомов и атомов отдачи — линейно (т.е. без рассеяния);
- столкновения упругие;
- столкновение первичного атома — происходит с каждым атомом по ходу его движения;
- столкновение происходит с неподвижными атомами (т.е. атомы мишени успевают релаксировать до прихода следующего первичного атома);

- Каскад столкновений, рассматривается в среде, не имеющей строгой кристаллической структуры.

- Рассматривается бесконечная мишень — не имеющая границу раздела сред.

И тогда в результате решения кинетического уравнения Больцмана, Зигмунд получил следующие результаты зависимости углового распределения частиц:

$$Y \sim \cos^n \theta$$

$$n = 1 + \frac{8}{3} N C_m^{3/2}$$

$$C_m = \frac{\pi}{2} \lambda_m a^2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^m \left(\frac{2Z_1 Z_2 e^2}{a} \right)^{2m}$$

$$a = \frac{0,885 a_0}{\sqrt{z_1^{\sqrt[3]{2}} + z_2^{\sqrt[3]{2}}}}$$

где N — атомная концентрация, Z_i M_i — заряды и массы ионов и атомов, λ_m — безразмерная функция от m , e — заряд электрона, a — радиус экранирования, $a_0 = 0,529 \text{ \AA}$, m — параметр экранировки в зависимости от энергии.

Многочисленные эксперименты показывали, что распыление подчиняется этому закону. Однако, все эти

*E-mail: mbarbara1996@mail.ru

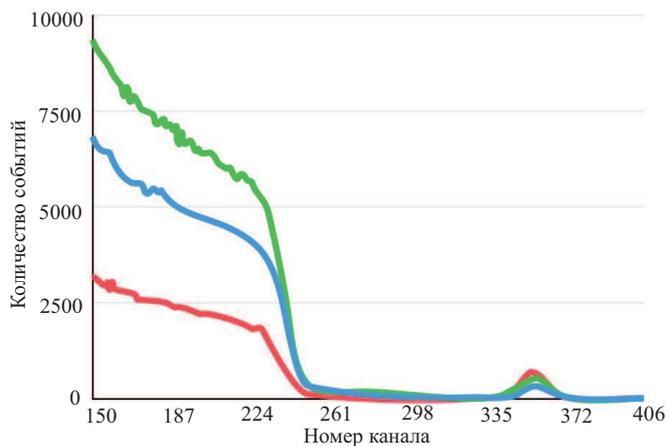


Рис. 1: Спектр РОР

эксперименты были проведены при энергиях до 10 кэВ. Более того, в формуле, хоть и неявно, но очевидно присутствует зависимость от массы, что так или иначе должно влиять на результаты.

В данной работе целью было провести эксперименты путем распыления германия на алюминиевом коллекторе, снятия и обработки спектров обратного резерфордовского рассеяния при четырех энергиях: 80, 200, 250 и 300 кэВ, чтобы проверить выполнение этой теории на более высоких энергиях.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сам эксперимент проводился при помощи коллекторной методики. При распылении мишень находилась на расстоянии 15 мм от алюминиевого коллектора, бомбардировка производилась ионами аргона. Анализ коллектора проводился с помощью метода резерфордовского обратного рассеяния [15,16]. Метод основан на явлении упругого рассеяния ускоренных частиц, при соударении их с атомами исследуемого образца.

Использовалась формула, которая учитывает, что в реальности частица не является неподвижной, а испытывает в результате рассеяния отдачу и сдвигается из начального положения:

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left(\left\{ 1 - [(M_1/M_2) \sin \theta]^2 \right\}^{1/2} + \cos \theta \right)^2}{\left(1 - [(M_1/M_2) \sin \theta]^2 \right)^{1/2}} \quad (1)$$

Так же методом атомно-силовой микроскопии изучался рельеф, а именно его деформация под излучением, так как потенциально его изменение может влиять на угловые распыления.

сти не развился существенный рельеф, который мог бы влиять на угловые распределения, так как средняя шероховатость составила 15 нм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлен спектр резерфордовского рассеяния, который был получен и обработан для каждой точки.

Затем спектры были обработаны и построены графики зависимости коэффициента распыления Y от угла θ (рис. 2–4).

Далее было выполнено сравнение экспериментальных значений коэффициента n для Германия при энергиях выше 10 кэВ с другими экспериментами [17].

Имеется резкий провал в обоих экспериментах, и его величина не очевидна, так как нет предпосылок, чтобы величина n как-то уменьшалась. Природа этого провала пока не известна и, предположительно, она может быть связана с какими-то внутренними структурными преобразованиями. Соответственно, необходимо дальше исследовать эту область. Метод атомно-силовой микроскопии [18,19] показал, что в облученной обла-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проверялось выполнение теории Зигмунда. На данный момент именно его теория считается самой важной в области распыления, так как она учитывает наибольшее количество нюансов ионного распыления.

1. В результате проделанной работы были получены и обработаны спектры резерфордовского обратного рассеяния и получены значения n при энергиях 80, 200, 250 и 300 кэВ.
2. Показано отклонение от теории Зигмунда. Так как согласно теории степенной коэффициент n должен увеличиваться с ростом энергии, а на деле в области 200 кэВ образуется провал.
3. Метод АСМ показал, что существенный рельеф не возникает.

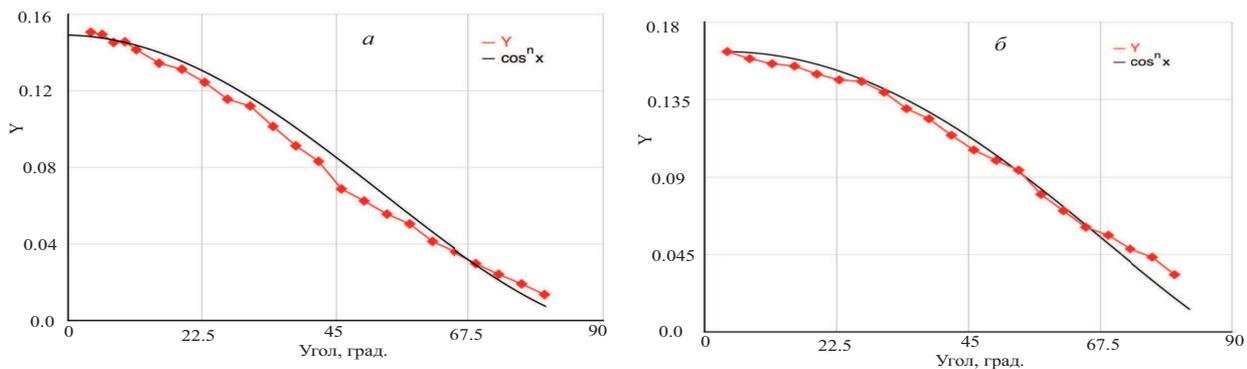


Рис. 2: *a* — Угловые распределения при энергии 80 кэВ : $n = 1.61$, *б* — угловые распределения при энергии 200 кэВ : $n = 1.215$

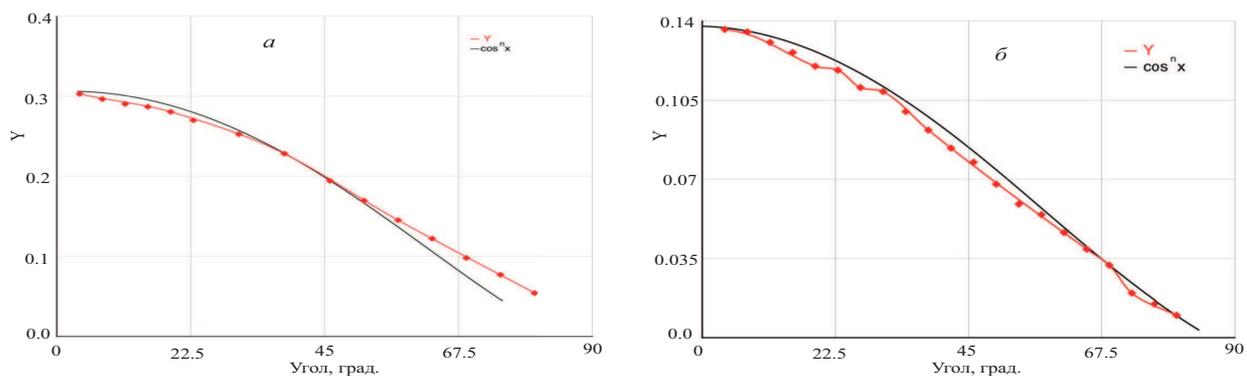


Рис. 3: *a* — Угловые распределения при энергии 250 кэВ : $n = 1.23$, *б* — угловые распределения при энергии 300 кэВ : $n = 1.47$

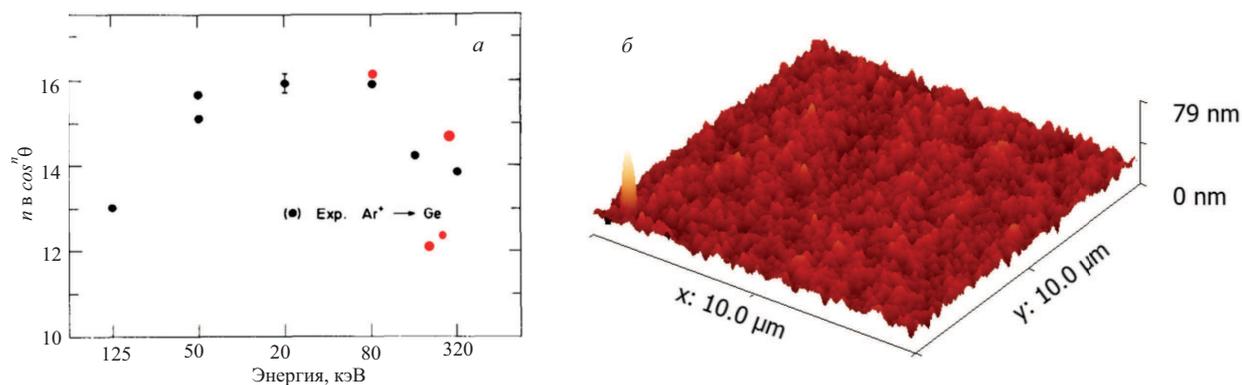


Рис. 4: *a* — Экспериментальные значения n для германия при различных энергиях, *б* — рельеф

Таблица I: Значения коэффициента n в зависимости от энергии

N	Энергия, кэВ	Значение n
1	80	1.61
2	200	1.215
3	250	1.23
4	300	1.47

Благодарности

Выражаю благодарность моему научному руководителю ст. науч. сотруднику А. А. Шемухину, сотрудни-

кам кафедры общей ядерной физики и зав. кафедрой профессору Ишханову Б. С., а также Балакшину Ю. А и Миннебаеву Д. К. за в обработке коллекторов методом резерфордовского обратного рассеяния.

- [1] *Grove W. R.* Trans. Roy. Soc. London. 1852. **142**. P. 87.
 [2] *Parikshit Phadke, Jacobus M. S., Robbert W. E., van de Kruijs* Near-threshold sputter yields of ruthenium under argon and nitrogen ion bombardment Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Elsevier BV, Нидерланды, 2018.
 [3] *Елецкий А. В.* УФН. 1997. **167**, № 9. С. 945.
 [4] *Лозовик Ю. Е., Попов А. М.* УФН. 1997. **167**, № 7. С. 751.
 [5] *Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П.* Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий в 2-х т. / Коркишко Ю. Н. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2010–2014.
 [6] *Debasree Chowdhury, Debabrata Ghose.* Fabrication of nanoscale topographies on Ge(100) surface by low energy Ar⁺ ion sputtering. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. **409**. Elsevier BV, Нидерланды, 2017.
 [7] *Minnebaev D. K., Balakshin Yu. V., Nazarov A. V., Kharitonov I. D., Zaitsev E. V., Zabolotskiy A. D., Bukunov K. A., Chernysh V. S., Skemukhin A. A.* Irradiation-induced defects in graphene on copper. *Garaj S, Hubbard W, Golovchenko J A Appl. Phys. Lett.* 2010. **97**. 183103.
 [8] *Galashev A. E., Galasheva A. A.* High Energy Chem. 2014. **48**. P. 112.
 [9] *Galashev A. E., Galasheva A. A.* High Energy Chem. 2014. **48**. P. 112.
 [10] *Nelayev V, Mironchik A. Mater. Phys. Mech.* 2010. **9** P. 26.
 [11] *Kogeshima H et al. Jpn. J. Appl. Phys.* 2011. **50**. 070115.
 [12] *Sigmund P.* Six decades of atomic collisions in solids. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Elsevier BV, Нидерланды, 2016.
 [13] *Sigmund P.* Phys. Rev. 1969. **184**. P. 383; 1969. **187**. P. 768.
 [14] *Sigmund P.* Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1987. **27**. P. 1.
 [15] Физическое распыление одноэлементных твёрдых тел. / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984.
 [16] Физическое распыление одноэлементных твёрдых тел. Выпуск II/ Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1986.
 [17] *Chini T. K., Tanemura M., Okuyarna F.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 1996. **119**. С. 389.
 [18] *Миронов В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. / Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004.
 [19] *Фелдман Л., Майер Д.* Основы анализа поверхности и тонких пленок. / Пер. с англ. М.: Мир, 1989.

Sputtering of semiconductors by high-energy ions

B. Merzuk, D. K. Minnebaev, A. A. Shemuhin, Yu. V. Balakshin

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^ambarbara1996@mail.ru

This article discusses the phenomenon of sputtering: its application, history and properties. An integral part of which is the basic Zygmond's theory, which is currently considered to be the main one in the field of sputtering, since it takes into account the greatest number of nuances of ion sputtering. It states that the coefficient of ion sputtering Y is proportional to the cosine of the sputtering angle θ in the n degree, which depends on mass and charge. That is, theoretically, it should increase with an increase in the energy of the incident particles. When checking this statement at energies of the order of 10 keV, the theory was performed, however, experiments conducted at higher energies (80, 200, 250 and 300 keV) demonstrated that this is not the case, and in the range of 200 - 250 keV there is a significant dip in the value of coefficient.

PACS: 68.49.Sf, 79.20.Rf.

Keywords: sputtering, germanium, quartz oscillator, semiconductor.

Received 2019.

Сведения об авторах

1. Мерзук Барбара — студент; тел.: (495)939-24-16, e-mail: mbarbara1996@mail.ru.
2. Миннебаев Дамир Кашифович — студент; тел.: (495)939-24-16, e-mail: Srpxvi@gmail.com.
3. Балакшин Юрий Викторович — науч. сотрудник; тел.: (495)939-24-16, e-mail: balakshiny@gmail.com.
4. Шемухин Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-16, e-mail: shemuhin@gmail.com.