

Экспериментальное исследование пространственного распределения плотности потока быстрых нейтральных частиц методом кварцевого микровзвешивания

Ю. П. Маишев, С. Л. Шевчук, В. П. Кудря

Разработана экспериментальная система измерения пространственного распределения плотности пучка быстрых нейтральных частиц (БНЧ), основанная на использовании метода пьезокварцевых датчиков. С помощью программной обработки экспериментальных данных получены кривые распределения плотности потока частиц в сечении пучка.

Ключевые слова: пучки быстрых нейтральных частиц, диагностика пучков быстрых нейтральных частиц, метод пьезокварцевого резонатора

Введение

Пучки быстрых нейтральных частиц (БНЧ), полученных из низкотемпературной плазмы инертных или химически активных газов, активно применяются в современной технологии производства приборов микро- и нанoeлектроники для очистки поверхности, распыления и травления диэлектриков, полупроводников и металлов, послойного травления, осаждения тонких пленок непосредственно из пучков или методом распыления, а также осаждения с ассистированием нейтральным пучком, окисления, азотирования и фторирования приповерхностного слоя, изготовления элементов микро- и нанoeлектромеханических устройств, наноструктурирования, а также модификации самоорганизующихся органических молекулярных структур (см., например, обзор [1]). Кроме того, технология пучков БНЧ активно используется в таких областях, как оптоэлектроника, микро- и нанооптика, микро- и наномеханика, вторично-ионная масс-спектрометрия сложных материалов, а также в машиностроении и медицине при создании антифрикционных, износостойких, коррозионно-стойких, упрочняющих и биосовместимых покрытий.

Разработка и оптимизация источников пучков БНЧ и технологий, основанных на их применении, не могут эффективно осуществляться без проведения измерения характеристик пучков БНЧ. Последовательное изложение принципов, лежащих в основе существующих методов измерения параметров пучков БНЧ, изложены в работах [2, 3]. Совершенствование и разработка новых методов измерения параметров пучков БНЧ продолжается во многих научных центрах мира.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования возможности применения пьезокварцевых резонаторов для измерения распределения плотности потока в поперечном сечении пучков БНЧ, источник которых разработан в Лаборатории ионно-лучевых технологий ФТИАН РАН [4].

Метод кварцевого микровзвешивания

Использование пьезокварцевых резонаторов для измерения скорости удаления или нанесения вещества (а также связанных с ней величин) основано на зависимости резонансной частоты пьезокварцевого кристалла F_{res} от величины массы пленки удаляемого или наносимого вещества на его поверхности. При этом измеряется скорость изменения частоты генератора, в цепь положительной обратной связи которого включен этот резонатор. Так как частота генерации может быть измерена довольно точно, метод обладает очень высокой чувствительностью. Важно отметить, что детекторы такого типа могут работать и с пучками ионов, если предусмотреть заземление пленки.

Впервые пьезоэлектрический детектор, предназначенный для измерения интенсивности пучков БНЧ, был описан в работе [5]. Тем не ме-

Маишев Юрий Петрович, г.н.с, зав. лаб., д.т.н.
Шевчук Сергей Леонидович, с.н.с., к.т.н.
Кудря Владимир Петрович, в.н.с., к.ф.-м.н.
Физико-технологический институт РАН.
Россия, 117218, Москва, Нахимовский проспект, 36, корп. 1.
Тел. 8(499) 129-76-33.
E-mail: kvp@ftian.ru

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.

нее, из-за относительной сложности обработки результатов детекторы этого типа не получили достаточно широкого распространения для диагностики нейтральных пучков. Можно отметить только несколько работ [6–8], в которых для измерения потока быстрых атомов Ne, Ag и Kr с энергией от 100 до 1000 эВ использовался кварцевый резонатор с нанесенной на рабочую поверхность тонкой пленкой меди (детали конструкции и схемы включения в указанных работах не приведены). При этом измеренная величина эквивалентной плотности тока нейтрального пучка составляла 20–50 мкА/см².

Первая попытка теоретического объяснения зависимости изменения резонансной частоты пьезокристалла от массы пленки, расположенной на одной из его плоскостей, была предпринята в работе [9], в которой исследовался метод подстройки резонансной частоты кварцевых резонаторов путем осаждения на их поверхности металлических контактных площадок. Хотя предложенный в указанной статье подход не во всем является корректным, он, тем не менее, получил широкое распространение в силу своей простоты и наглядности. Если преобразовать полученную в [9] формулу, связывающую изменение резонансной частоты ΔF_{res} с изменением присоединенной массы Δm (массы осаждаемой на поверхность кристалла пленки или массы распыляемого с поверхности материала), то получим линейную зависимость:

$$\Delta F_{res} = -k\Delta m, \quad (1)$$

где k — чувствительность пьезоэлектрического элемента (размерность Гц/кг), определяемая формулой:

$$k = \frac{F_{res}^2}{N\rho_q S}, \quad (2)$$

где S — площадь поверхности резонатора, ρ_q — плотность материала резонатора, N — частотная константа, которая определяется материалом резонатора и ориентацией вырезаемой из этого материала пластины.

Рассмотрим теперь, как изменение резонансной частоты связано с величиной потока частиц, распыляющих пленку на поверхности пьезоэлектрического резонатора. Если частицы в падающем пучке имеют распределение по энергиям $f(E)$, то плотность потока БНЧ можно определить по формуле:

$$P = \frac{1}{kmS\bar{Y}} \left| \frac{dF_{res}}{dt} \right|, \quad (3)$$

где m — масса распыляемого одним падающим атомом фрагмента материала пленки-мишени, а эффективный коэффициент распыления определяется формулой:

$$\bar{Y} = \int_{E^{th}}^{\infty} dEf(E)Y(E), \quad (4)$$

где $Y(E)$ — зависимость коэффициента распыления от энергии, E^{th} — пороговая энергия распыления. В случае моноэнергетического пучка используется коэффициент распыления при соответствующей энергии падающих частиц.

Таким образом, при сканировании кварцевого детектора по сечению пучка БНЧ локальная скорость изменения частоты генерации будет пропорциональна локальному значению потока частиц. Калибровку детектора можно выполнить, например, используя поток ионов, так как в этом случае поток частиц можно определить, измеряя распределение плотности тока по сечению пучка.

В работе [3] подробно описан подход к выбору материала пленки с учетом чувствительности детектора и срока службы нанесенной пленки. Отметим, что в соответствии с указанными критериями компромиссными материалами являются W, Ta и Mo.

Оценим чувствительность метода измерения потока частиц с помощью кварцевого резонатора, используя формулу (3). Допустим, что кварцевый резонатор с АТ-срезом ($F_{res} = 6$ МГц, $N = 1,66 \times 10^5$ Гц×см, $\rho_q = 2,65$ г/см³), покрытый пленкой вольфрама ($m = 3,1 \times 10^{-22}$ г), используется для измерения потока быстрых атомов аргона с энергией 1 кэВ (значение $Y = 0,8$). Если время измерения в одной точке ограничено величиной 1 с, а точность измерения частоты составляет 0,5 Гц, то минимальный поток, который может быть измерен, равен 5×10^{13} атом/(см² с).

Экспериментальные результаты

Эксперименты проводились на вакуумной технологической установке «Каштан» [10]. Откачной агрегат обеспечивал безмасляную откачку рабочей камеры турбомолекулярным насосом с эффективной быстротой откачки 720 л/с в диапазоне давлений $2 \times 10^{-2} - 1,3 \times 10^{-4}$ Па. Источником пучка БНЧ служил разработанный в Физико-технологическом институте РАН источник «Нейтрал-Л» с ленточной формой выходного пучка. В качестве рабочего газа использовался кислород.

Для обеспечения сканирования кварцевого детектора перпендикулярно пучку в технологическую камеру установки была встроена система возвратно-поступательного движения, выполнен-

ная на основе модифицированного высоковакуумного ввода типа ZBLM-275-8 SMMCS-MS (MDC Vacuum Products Corp., USA) [10]. Эта система обеспечивала линейное перемещение кварцевого детектора на расстояние до 200 мм.

В качестве датчиков детектора использовались кварцевые резонаторы с АТ-срезом, резонансной частотой 5000,0 кГц и диаметром серебряного электродного покрытия 5 мм. Измерение частоты кварцевых датчиков проводилось с помощью контроллера Inficon IQM-233 (INFICON Inc., USA). Для управления контроллером, предварительной обработки сигнала и выдачи результатов в виде файла в текстовом формате для контроллера было разработано специальное программное обеспечение. Отметим, что контроллер выдавал значение изменения толщины распыляемой пленки h относительно некоторого начального значения. При этом изменение резонансной частоты кварцевого резонатора пересчитывалось в изменение толщины слоя с использованием коэффициента распыления для средней энергии в заданном режиме работы источника «Нейтрал-Л».

На рис. 1 показан пример зависимости изменения толщины пленки серебра h от координаты линейного перемещения x . Следует отметить, что на экспериментальной зависимости наблюдается заметная шумовая составляющая, которая связана со случайными флуктуациями частоты генерации. При непосредственном дифференцировании таких данных (в соответствии с формулой (3)) получаются неприемлемые результаты, так как операция численного дифференцирования очень чувствительна к наличию шумовой составляющей. Для сглаживания экспериментальной зависимости использовался известный метод фильтрации фурье-гармоник дискретного спектра этой зависимости (см., например, [11]). Сглаженная зависимость

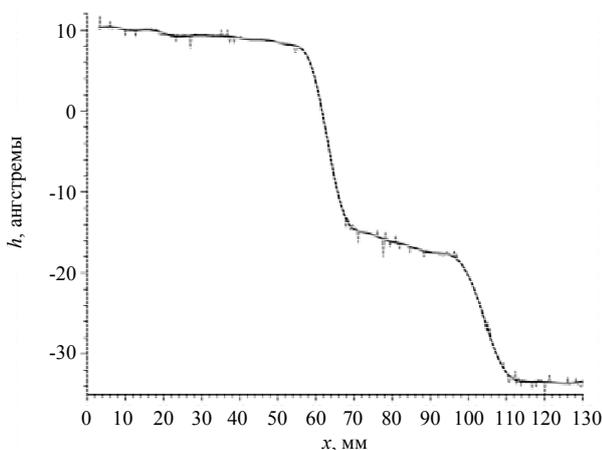


Рис. 1. Изменение толщины пленки при перемещении кварцевого детектора поперек пучка БНЧ (тонкая линия – эксперимент; толстая линия – после сглаживания).

также показана на рис. 1 сплошной толстой линией. Эта зависимость практически не имеет участков с положительным наклоном, что гарантирует отсутствие отрицательных величин при численном дифференцировании.

На рис. 2 показана зависимость производной $-dh/dx$ (в относительных единицах), пропорциональной локальной плотности потока БНЧ $P(x)$. Видно, что максимумы потока от щелей источника пучков БНЧ хорошо идентифицируемы. Расстояние между положениями максимумов соответствует конструктивному расстоянию между щелями.

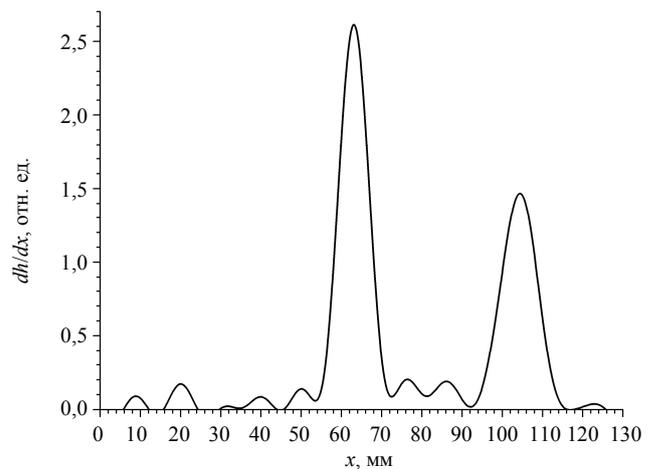


Рис. 2. Профиль плотности потока быстрых нейтральных частиц в поперечном сечении пучка.

Заключение

В работе впервые показано, что использование кварцевого пьезорезонатора в сочетании с системой линейного перемещения позволяет получать пространственные распределения плотности потока пучка быстрых нейтральных частиц – БНЧ. Данный метод отличается универсальностью и высокой точностью.

Развитие метода может идти как в направлении разработки методики калибровки датчика, особенно в случае пучков сложного состава, так и в направлении улучшения конструкции элементов измерительной системы с целью максимального подавления шумовой составляющей выходного сигнала.

Авторы благодарят ведущего инженера И. А. Бахратова за помощь в создании измерительной системы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФАНО России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудря В. П., Маишев Ю. П. // Труды Физико-технологического института РАН. 2012. Т. 22. С. 105.
2. Кудря В. П., Маишев Ю. П. // Труды Физико-технологического института РАН. 2017. Т. 26. С. 103.
3. Kudrya V. P., Maishev Yu. P. // Proceedings of the SPIE. 2016. Vol. 10224. P. 102242C.
4. Maishev Yu., Shevchuk S., Kudrya V. // Proceedings of the SPIE. 2014. Vol. 9440. P. 94400K.
5. McKeown D., Cabezas A. // Rev. Sci. Instr. 1963. Vol. 34. P. 1261.
6. Mizutani T., Nishimatsu S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. Vol. 6. P. 1417.
7. Mizutani T., Nishimatsu S. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1989. Vol. 7. P. 547.
8. Mizutani T., Yunogami T. // Jap. J. Appl. Phys. 1990. Vol. 29. P. 2220.
9. Spears R. A. // J. Brit. Inst. Radio Engineers. 1946. Vol. 6. No. 2. P. 50.
10. Маишев Ю. П., Шевчук С. Л., Терентьев Ю. П. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. С. 346. [Maishev Y. P., Shevchuk S. L., Terent'ev Y. P. // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. P. 304].
11. Хемминг Р. В. Численные методы для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. [Hamming R. W. *Numerical Methods for Scientists and Engineers* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1962)].

PACS: 07.77.GX; 37.20.+j

Experimental study of the spatial distribution of the flux density of fast neutral particles by the quartz micro-weighting method

Yu. P. Maishev, S. L. Shevchuk, and V. P. Kudrya

Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences
Bld. 1, 36 Nakhimovsky av., Moscow, 117218, Russia
E-mail: kvp@ftian.ru

Received March 15, 2018

Based on the quartz crystal microbalance method an experimental set up for the fast neutral particle beam flux density spatial distribution measurement has been developed and constructed. The flux density distributions along the beam cross section have been derived using a data computer processing.

Keywords: fast neutral particle beam, FAB, FAB diagnostics, quartz crystal microbalance method.

REFERENCES

1. V. P. Kudrya and Yu. P. Maishev, *Trudy Fiziko-Tekhnologicheskogo Instituta* **22**, 105 (2012) [in Russian].
2. V. P. Kudrya and Yu. P. Maishev, *Trudy Fiziko-Tekhnologicheskogo Instituta* **26**, 103 (2017) [in Russian].
3. V. P. Kudrya and Yu. P. Maishev, *Proceedings of the SPIE* **10224**, 10242C (2016).
4. Yu. Maishev, S. Shevchuk, and V. Kudrya, *Proceedings of the SPIE* **9440**, 94400K (2014).
5. D. McKeown and A. Cabezas, *Rev. Sci. Instr.* **34**, 1261 (1963).
6. T. Mizutani and S. Nishimatsu, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **6**, 1417 (1988).
7. T. Mizutani and S. Nishimatsu, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7**, 547 (1989).
8. T. Mizutani and T. Yunogami, *Jap. J. Appl. Phys.*, **29**, 2220 (1990).
9. R. A. Spears, *J. Brit. Inst. Radio Engineers*, **6**, No. 2, 50 (1946).
10. Y. P. Maishev, S. L. Shevchuk, and Y. P. Terent'ev, *Russian Microelectronics* **44**, 304 (2015).
11. R. W. Hamming, *Numerical Methods for Scientists and Engineers* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1962; Nauka, Moscow. 1968).