

Исследование нейтронных волноводов с магнитными слоями

С. В. Кожевников

Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна Московской обл., 141980
kozhevn@nf.jinr.ru

Рассматриваются трехслойные нейтронные волноводы, в которых можно управлять коэффициентом усиления нейтронной плотности с помощью перемагничивания внешних слоев магнитным полем. В работе регистрируется интенсивность нейтронного микропучка, выходящего из торца немагнитного среднего слоя. Получено, что интенсивность расходящегося микропучка зависит от знака поляризации падающего на поверхность волновода коллимированного пучка нейтронов.

Введение

Трехслойные плоские волноводы (рис. 1) позволяют получить рекордно узкие пучки нейтронов шириной порядка нескольких микрон, которые затем используются для исследования локально-неоднородных микроструктур с высоким пространственным разрешением. Коллимированный нейтронный пучок шириной порядка 0,1 мм и угловой расходимостью около $0,01^\circ$ падает под малым углом скольжения на поверхность волновода в вакууме (среда 0). Затем нейтроны проходят туннельным образом через тонкий верхний слой толщиной a (среда 1). В толстом среднем слое толщиной d (среда 2) нейтроны почти полностью отражаются от толстого нижнего слоя (среда 3) и частично отражаются от тонкого верхнего слоя (среда 1). Затем нейтроны распространяются вдоль среднего слоя как в канале и выходят из его торца в виде узкого микропучка с расходимостью порядка $0,1^\circ$, которая определяется условиями дифракции Фраунгофера на узкой щели $\delta\alpha_f \propto \lambda/d$, где λ – длина волны нейтронов. В работе [1] получен неполяризованный микропучок из волновода, а в [2] – поляризованный. В [3] проведено сравнение плоских волноводов с другими методами получения нейтронных микропучков (зеркальное отраже-

[1] получен неполяризованный микропучок из волновода, а в [2] – поляризованный. В [3] проведено сравнение плоских волноводов с другими методами получения нейтронных микропучков (зеркальное отражение от подложки при малых углах скольжения и дифракция из поглощающего нейтроны материала). Преимуществом волноводов является рекордно малая ширина и «чистый» микропучок, недостатком – низкая интенсивность и высокая угловая расходимость.

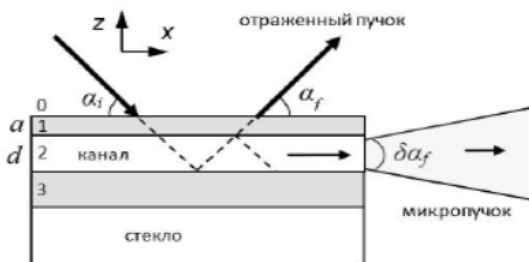


Рис. 1. Схема эксперимента с нейтронным волноводом

В слоистых волноводах одновременно наблюдается резонансное усиление нейтронной плотности [4] и каналирование нейтронов [5]. Резонансное усиление используется для усиления слабого взаимодействия нейтронов с веществом [6], а каналирование –

для получения микропучков [7]. В [8] предложено использовать нейтронные волноводы с внешними магнитными слоями для управления цепной реакцией деления урана с помощью перемагничивания слоев внешним магнитным полем. В нашей работе мы экспериментально исследуем такие волноводы.

Расчеты

На рис. 2 показана плотность длины рассеяния (ПДР) нейтронов для волновода $\text{Py}(20 \text{ нм}) / \text{Cu}(140) / \text{Py}(50) // \text{стекло}$ (рис. 2, а) и $\text{Fe}(20 \text{ нм}) / \text{Cu}(140) / \text{Fe}(50) // \text{стекло}$ (рис. 2, б). Пермаллой (Py) является магнитным сплавом Fe (20,6 % ат.) Ni (79,4 % ат.) с узкой петлей гистерезиса и намагниченностью насыщения около 10 кГс. Можно видеть, что для спина нейтронов «+» ПДР волноводов имеет вид глубокой потенциальной ямы, а для спина нейтронов «-» ПДР имеет вид мелкой ямы (рис. 2, а) или даже невысокого барьера (рис. 2, б). Введем следующие обозначения: $k_{0z} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha_i$, $k_{1z} = \sqrt{k_{0z}^2 - \rho_1}$, $k_{2z} = \sqrt{k_{0z}^2 - \rho_2}$, $k_{0x} = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha_i$. Здесь ρ_1 – ПДР для слоя 1, ρ_2 – ПДР для волноводного слоя 2. В резонансе для фазы волновой функции нейтронов выполняются периодические условия $\Phi(k_{0z}) = 2k_{2z}d + \arg(R_{21}) +$

$= \sqrt{k_{0z}^2 - \rho_2}$, $k_{0x} = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha_i$. Здесь ρ_1 – ПДР для слоя 1, ρ_2 – ПДР для волноводного слоя 2. В резонансе для фазы волновой функции нейтронов выполняются периодические условия $\Phi(k_{0z}) = 2k_{2z}d + \arg(R_{21}) + \arg(R_{23}) = 2\pi n$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ – порядок резонанса, и наблюдается резонансное усиление квадрата модуля волновой функции нейтронов в слое 2:

$$|\Psi|^2 = \frac{|T_{02}|}{|1 - R_{21}R_{23} \exp(2ik_{2z}d)|^2} \quad (1)$$

где T_{02} – амплитуда пропускания, а R_{21} и R_{23} – амплитуды отражения волновой функции. На рис. 3 приведен расчет квадрата модуля волновой функции нейтронов для длины волны нейтронов 4,26 Å для спина нейтронов «+» (или UP) и «-» (или DO). Намагниченность насыщения пермаллоя для расчета равна 7,0 кГс, а для железа равна 22,0 кГс. Можно видеть, что коэффициент усиления нейтронной плотности для спина UP доходит до 30, а для спина DO он гораздо меньше.

Экспериментальные результаты

Эксперименты проведены на рефлектометре поляризованных нейтронов NREX [9]. Использовался пучок нейтронов с длиной волны 4,26 Å и поляризацией 0,97. Размеры образцов равны $30 \times 30 \times 5$ мм. Расходимость падающего пучка $0,006^\circ$. Образцы были намагничены во внешнем магнитном поле 1,5 кЭ. Регистрировалась интенсивность микропучка

нейтронов из торца волновода для поляризации падающего пучка UP и DO (рис. 4). Можно видеть, что отношение интенсивности микропучка UP к интенсивности DO для волновода Py/Cu/Py за вычетом фона составляет 2,0 для $n = 0$, а для Fe/Cu/Fe – около 4,0. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают предварительные расчеты.

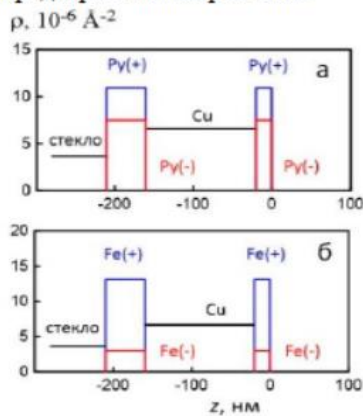


Рис. 2. ПДР для волноводов: а) Py/Cu/Py; б) Fe/Cu/Fe

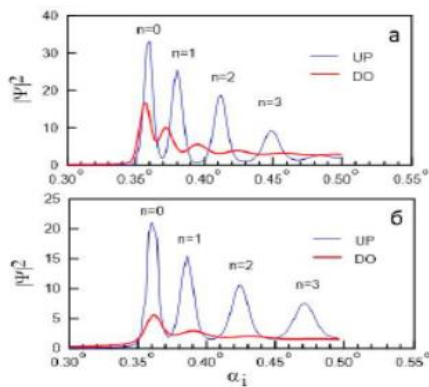


Рис. 3. Расчет квадрата модуля волновой функции нейтронов внутри волновода в зависимости от угла скольжения падающего пучка с поляризацией UP (тонкая линия) и DO (толстая линия): а) Py/Cu/Py; б) Fe/Cu/Fe

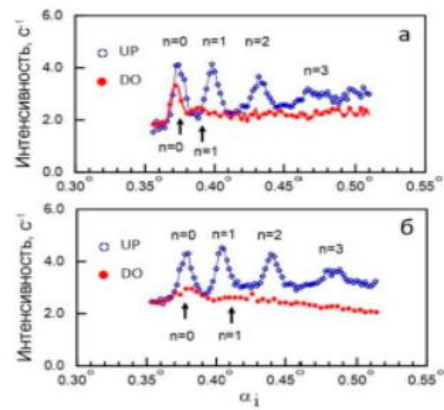


Рис. 4. Интенсивность микропучка для поляризации падающего пучка UP (открытые символы) и DO (закрытые символы): а) Py/Cu/Py; б) Fe/Cu/Fe

Автор благодарит А. Рюма (A. Rühm) и Ю. Н. Хайдукова за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. F. Pfeiffer, V. Leiner, P. Høghøj, I. Anderson // *Phys. Rev. Lett.* **88**, 055507 (2002).
2. S. V. Kozhevnikov, A. Rühm, F. Ott, et al. // *Physica B.* **406**, 2463 (2011).
3. F. Ott, S. Kozhevnikov, A. Thiaville, et al. // *Nucl. Instrum. and Meth. A.* **788**, 29 (2015).
4. F. Radu, V. K. Ignatovich // *Physica B.* **292**, 160 (2000).
5. V. K. Ignatovich, F. Radu // *Phys. Rev. B.* **64**, 205408 (2001).
6. Ю. В. Никитенко // *ЭЧАЯ.* **40**, 1682 (2009).
7. С. В. Кожевников // *ЭЧАЯ.* **50**, 284 (2019).
8. S. P. Pogossian // *J. Appl. Phys.* **102**, 104501 (2007).
9. Yu. N. Khaydukov, O. Soltwedel, T. Keller // *J. Large Scale Research Facilities A.* **38**, 1 (2015).