

УДК 539.17:535.44

О ВОЗМОЖНОМ ВОЛНОВОМ МЕХАНИЗМЕ, ПРИВОДЯЩЕМ К ПОВЫШЕНИЮ ВЫХОДА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

© 2020 г. А. А. Крайский^а, А. В. Крайский^{б, *}

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

^бФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: kraiski@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 04.04.2019 г.

После доработки 10.05.2019 г.

Принята к публикации 14.05.2019 г.

Рассматривается возможность применения одного из свойств распространения волн в периодических структурах для объяснения известного эффекта повышения выхода ядерных DD-реакций в кристаллических пленках. Эффект наблюдается при бомбардировке низкоэнергетическими дейтронами (менее 100 кэВ) дейтерированных мишеней из металлической фольги с оксидной пленкой в большинстве металлов: выход многократно повышается по сравнению с ожидаемым выходом при экстраполяции данных, полученных для высокоэнергетических дейтронов. Исходя из аналогии уравнений, описывающих распространение световой волны в фотонном кристалле и частицы в кристалле, сделан вывод об аналогии свойств волновых функций частиц в кристалле и светового поля в фотонном кристалле. Для частиц в спектре могут быть запрещенные зоны с окнами прозрачности, свойства которых также аналогичны свойствам окон в фотонном кристалле. В них амплитуда волновой функции налетающей на кристалл массивной частицы может увеличиваться, что нужно учитывать при рассмотрении увеличения выхода ядерных реакций с участием движущихся частиц.

Ключевые слова: ядерные реакции, кристаллы, увеличение выхода, дейтроны.

DOI: 10.31857/S1028096020020107

ВВЕДЕНИЕ

В литературе отмечается (например, [1, 2]), что измерение сечений ядерных реакций синтеза при низких энергиях (не более 100 кэВ) представляет значительный интерес, и так как прямое измерение сечений в этой области затруднено, их вычисляют с помощью экстраполяции из области высоких энергий, где их измеряют на ускорителях. В экспериментах на ускорителях с низкими энергиями (менее 10 кэВ) при использовании твердотельных мишеней с имплантированным в них дейтерием наблюдается значительное увеличение выхода DD-реакции по сравнению данными, полученными экстраполяцией из области высоких энергий. В [3, 4] исследовано свыше 70 элементов периодической системы, и в большинстве исследованных металлов, кроме шести, этот эффект обнаружен. При более высоких плотностях тока и меньшей энергии ионов (0.8–2.5 кэВ) наблюдается еще большее увеличение выхода этой реакции [5], а при энергии ионов 1.0 кэВ коэффициент увеличения выхода реакции составил 10^9 [6].

В [1] использовали мишень из фольги Pd с пленкой оксида PdO на поверхности. Перед экс-

периментом образцы насыщали дейтерием. В [2] брали образцы из фольги Ti со слоем оксида, которые также насыщали дейтерием. Энергия ионов составляла от 10 до 25 кэВ. В обоих материалах наблюдалось увеличение выхода DD-реакции с уменьшением энергии ионов. В титановой мишени выход при 10 кэВ увеличивался в два раза, в палладиевой – в четыре. Таким образом, эффект обусловлен столкновениями инжектированных дейтронов с дейтронами, абсорбированными кристаллической решеткой. Он зависит от ориентации мишени – при разной ориентации выход может различаться в несколько раз. Эти данные в совокупности с данными [3–6] вызывают необходимость рассмотреть значимый аспект распространения волн в периодических структурах, который может играть большую роль в повышении выхода подобных реакций для дейтронов.

Цель настоящей работы – определить механизм увеличения амплитуды волновой функции налетающих дейтронов внутри кристалла, что хорошо известно в оптике видимого, ИК- и радиодиапазона, т.е. эффект, связанный с движением налетающего дейтрона в периодическом поле

кристалла. Все вопросы, касающиеся ядерных реакций, выходят за рамки настоящей работы.

СОПОСТАВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ДВИЖЕНИЯ МАССИВНОЙ ЧАСТИЦЫ И СВЕТА В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В работе речь пойдет о возможном увеличении внутри кристалла по сравнению с вакуумом концентрации налетающих (падающих) дейтронов при определенных значениях их энергии (и, соответственно, длинах волн де Бройля). Вопросы об изменениях концентрации частиц-мишеней, абсорбированных кристаллической решеткой, здесь не рассматриваем. Будем исходить из свойства увеличения амплитуды падающей световой волны при некоторых значениях энергии в фотонном кристалле (впервые рассмотрено в [7], далее развито, например, в [8]). Спектр пропускания светового излучения такого кристалла имеет ряд запрещенных зон с центрами, соответствующими резонансному брэгговскому отражению, внутри которых излучение практически не распространяется. Резонанс осуществляется, когда длина волны в среде (или ее гармоника, т.е. длина волны, уменьшенная в целое число раз) совпадает с соответствующим удвоенным периодом решетки. Для фотонного кристалла конечной толщины вне запрещенных зон вблизи их границ при отсутствии потерь вследствие поглощения и светорассеяния наблюдается ряд максимумов полного пропускания, называемых окнами прозрачности. Расчет показывает, что повышение интенсивности светового излучения внутри кристалла при длине волны излучения, соответствующей полному пропусканию света, может достигать многих порядков. Это подтверждается рядом экспериментов, в частности, при генерации второй гармоники [9], спонтанном [10] и вынужденном комбинационном рассеянии света [11].

Световое поле в одномерном фотонном кристалле описывается выражением:

$$-\frac{1}{\varepsilon(x)} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) = \frac{\omega^2}{c^2} u(x), \quad (1)$$

где ω — частота, $\varepsilon(x)$ — диэлектрическая проницаемость, $u(x)$ — комплексная амплитуда электрического вектора светового поля. Волновая функция $\psi(x)$ массивной частицы (налетающей частицы) описывается уравнением:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U(x) \right] \psi(x) = E \psi(x), \quad (2)$$

где m — масса частицы, $U(x)$ — периодическое поле кристалла, E — энергия частицы.

Как показано в [7, 8, 12, 13], интенсивность падающей световой волны в фотонном кристалле в окнах прозрачности сильно повышается, максимум распределения интенсивности по толщине

кристалла растет как N^2 , где N — число слоев. Рассмотрим, насколько глубока аналогия между задачами на собственные значения (1) и (2) в применении к падающим волнам (налетающим частицам). Как и в случае фотонного кристалла (1), в случае массивной частицы (2) должно быть ненулевое отражение от одного слоя. Как и в случае (1), в (2) при выполнении брэгговских условий в кристалле возможно существование запрещенных зон. Оба оператора в левых частях уравнений периодические. В случае конечного кристалла сшивка решений на его границах происходит аналогично сшивке в фотонном кристалле. Следовательно, можно сделать вывод, что и для налетающих массивных частиц (2), возможно, будут возникать окна прозрачности вблизи запрещенной зоны с увеличением амплитуды волновой функции в них, и характер увеличения амплитуды волновой функции будет подобен увеличению амплитуды падающей световой волны в фотонном кристалле. Увеличение квадрата модуля волновой функции падающих частиц в окнах прозрачности означает увеличение вероятности присутствия налетающей частицы в данной точке, что может приводить к соответствующему увеличению выхода реакций ядерного синтеза [1–6]. Подчеркнем, что речь идет об увеличении по сравнению с отсутствием кристаллической решетки концентрации налетающих частиц при тех же параметрах падающего пучка (та же концентрация и энергия частиц в нем) за пределами кристалла. Величина этого эффекта кардинально зависит от энергии налетающих частиц и максимальна при попадании в окно прозрачности [13].

В [13] без конкретизации профиля диэлектрической проницаемости фотонного кристалла и без нахождения собственных функций для поля с помощью теории возмущений показана в общем виде известная [8] для окон прозрачности зависимость коэффициента повышения интенсивности излучения внутри фотонного кристалла от его параметров, а также зависимость от этих же параметров положения и ширин этих окон. Интенсивность волны пропорциональна квадрату числа периодов.

Простая оценка показывает, что при периоде 0.366 нм, относительной амплитуде переменной части потенциала, равной 0.01, и толщине кристалла 36.6 мкм увеличение амплитуды волновой функции составляет 10^3 (по сравнению с отсутствием кристаллической решетки), что соответствует повышению интенсивности 10^6 . Это увеличение носит чисто оценочный характер и справедливо только для очень узкого спектрального диапазона. Тем не менее, для частиц с соответствующей энергией в узком энергетическом диапазоне (падающем в окно прозрачности) можно утверждать, что в случае кристалла в 10 раз большей толщины выход реакций в единицу времени должен быть в 100 раз больше. Хотя это вы-

ходит за рамки настоящей работы, заметим, что рассматриваемые дейтроны (с энергией порядка 10 кэВ) достаточно энергичны для туннелирования под кулоновским барьером. Оценку вероятности такого туннелирования, т.е. отношение квадрата модуля волновой функции до барьера и после (в области ядра) можно провести, следуя методу, изложенному в [14] (стр. 218, задача 2). Там рассматривается туннелирование частицы с моментом $l=0$ (при не равном нулю моменте l амплитуда волновой функции частицы уменьшается к центру как r^l , и, соответственно, вероятность оказаться в центре отсчета, совпадающим с ядром, близка к нулю). При рассмотрении движения частицы с $l=0$ задача становится одномерной, и можно применить формулу ([14], формула (50.5)):

$$w \sim \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^{\alpha/E} \sqrt{2m\left(\frac{\alpha}{r} - E\right)} dr\right). \quad (3)$$

Здесь r_0 – радиус ядра, α – кулоновская константа взаимодействия $\alpha = Z_1 Z_2 e^2$, e – заряд электрона, $Z_1 e$ и $Z_2 e$ – заряды взаимодействующих частиц. Проводя интегрирование с учетом предельного перехода $r_0 \rightarrow 0$, получаем для вероятности туннелирования w выражение:

$$w \sim \exp\left(-\frac{\pi\alpha}{\hbar} \sqrt{\frac{2m}{E}}\right) = \exp\left(-\frac{2\pi\alpha}{\hbar v}\right), \quad (4)$$

при условии, когда $\alpha/(\hbar v) \gg 1$. По формуле (4) можно оценить вероятность туннелирования дейтрона под кулоновским барьером с энергией E .

Для падающего дейтрона с энергией 10 кэВ вероятность составляет 0.76×10^{-6} , с энергией 24 кэВ – 1.1×10^{-4} . Вероятность мала, но такую “малость” вполне может компенсировать рост амплитуды волновой функции из-за наличия кристалла. В случае оптики увеличение амплитуды световой волны пропорционально росту числа слоев, а интенсивности (аналог квадрата модуля волновой функции) – квадрату числа слоев. Приведенные выше оценки дают рост квадрата модуля волновой функции перед барьером в 10^6 раз. Следовательно, сравнивая вероятности надбарьерного прохождения в отсутствие кристалла (считая его вероятность близкой к единице) и туннелирования дейтрона с энергией 10 кэВ в кристалле, видим, что они будут близки. Для достижения такого же результата при энергии дейтронов 24 кэВ необходимо в 10 раз меньшее число периодов решетки. Самое низкое значение энергии, при которой возможен резонанс, будет при совпадении длины волны частицы с периодом кристаллической решетки. Для такого периода длина волны де Бройля составляет 0.732 нм, что соответствует энергии дейтрона 7.65×10^{-4} эВ и его скорости 271 м/с. Следует отметить, что это основной резонанс, т.е. запрещенная зона с минимальной энергией дейтрона (или максималь-

ной длиной волны), при которой возможен эффект. Частицы с энергией порядка 10–20 кэВ попадают в область запрещенных зон с достаточно большой энергией. Однако эффекты увеличения могут иметь место и для частиц с такой энергией, попадающей в окно прозрачности. Эти рассуждения основаны на принципах [13]. Ситуация в случае коротких длин волн при рассмотрении движения частицы и одном периоде потенциала аналогична работе интерферометра Фабри–Перо в оптике, когда расстояние между зеркалами много больше длины волны света. И как в оптике, где можно поставить последовательно ряд зеркал, которые образуют составной интерферометр Фабри–Перо (что хорошо известно), так и в рассматриваемом случае ряд последовательных периодов образует подобную структуру с одинаковыми расстояниями между границами. Около таких зон также располагаются окна прозрачности. Однако условия их работы требуют специального рассмотрения.

Отметим, что все изложенное выше относится к установившемуся стационарному состоянию. В случае входа в кристалл одиночной частицы надо учитывать динамический процесс, что может изменить течение процесса, скорее всего, количественно. Этот вопрос требует специального рассмотрения. Стоит также отметить, что в области дефектов в кристалле может повышаться амплитуда волновой функции, аналогично тому, как это происходит в фотонном кристалле. В качестве примера можно привести так называемые “таммовские состояния”, когда нарушается периодичность. Тогда возле дефекта даже внутри запрещенной зоны интенсивность световой волны в фотонном кристалле может увеличиваться сильнее, чем в окне прозрачности. В [1, 2] на фольгу из металла был нанесен оксид, т.е. применяли неоднородные системы. Отмеченный эффект мог иметь место в случае резкого изменения свойств периодичности. Поэтому для интерпретации результатов с помощью этого механизма важна структура слоев мишени (моно- или поликристаллической, в последнем случае – соотношение размеров кристалликов с толщиной слоя и характер их контактов).

В трехмерном кристалле рассмотрение в рамках одномерной модели возможно в случае пренебрежимо малой связи рассматриваемой моды с другими модами, когда обмен частицами между этими модами ничтожен. В противном случае необходимо специальное рассмотрение. Отметим, что в трехмерном случае, видимо, не требуется обязательное существование полной запрещенной зоны, т.е. наличие зоны во всех направлениях и полный запрет распространения по всем направлениям при какой-либо энергии. Для эффекта достаточно наличия зоны (или энергетической щели) в каком-либо направлении.

Все сказанное выше можно отнести не только к ядерным реакциям между движущимися внутри

твердого тела и адсорбированными кристаллической решеткой дейтронами, но и к ядерным реакциям движущегося внутри твердого тела дейтрона с составляющими самой решетки, вероятность выхода которых также может повышаться. Следует заметить, что ранее были предприняты попытки объяснить увеличение выхода таких реакций путем бозе-конденсации дейтронов [15, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе, исходя из аналогии уравнения, описывающего распространение света без потерь в среде с периодической диэлектрической проницаемостью, и уравнения Шредингера с периодическим потенциалом, описывающим движение массивной заряженной частицы внутри кристаллической решетки, высказывается предположение, что, как и в случае светового поля в окнах прозрачности [7, 8, 12, 13], в случае материальной частицы также может происходить увеличение амплитуды волновой функции в возникающих “окнах прозрачности”, расположенных возле запрещенных зон, что может приводить к увеличению выхода ядерных реакций с участием движущихся частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. Т. 39. № 9. С. 3.
2. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. Т. 39. № 12. С. 3.
3. Raiola F., Migliardi P., Gyurky G. et al. // Eur. Phys. J. A. 2002. V. 13. P. 377.
4. Raiola F., Migliardi P., Gang L. et al. // Phys. Lett. B. 2002. V. 547. P. 193.
5. Линсон А.Г., Русецкий А.С., Карабут А.Б., Майли Дж. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. № 6. С. 1334.
6. Bosch H.S., Halle G.M. // Nucl. Fusion. 1994. V. 32. P. 611.
7. Канаев В.В. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 11. С. 2271.
8. Bendickson J.M., Dowling J.P., Scalora M. // Phys. Rev. E. 1996. V. 53. P. 4107.
9. De Angelis C., Gringoli F., Midrio M., Modotto D., Aitchison J.S., Nalesso G.F. // J. Opt. Soc. Am. B. 2001. V. 18. P. 348.
10. Dovbeshko G., Fesenko O., Boyko V., Romanyuk V., Gorelik V., Moiseenko V., Sobolev V., Shvalagin V. // Ukr. J. Phys. 2012. V. 57. № 2. P. 154.
11. Gorelik V.S., Kudryavtzeva A.D., Tcherniega N.V., Vodchits A.I., Orlovich V.A. // J. Russ. Laswe Res. 2013. V. 34. № 1. P. 1.
12. Hopman W.C.L., Hoekstra H.J.W.M., Dekker R., Zhuang L., de Ridder R.M. // Optics Express. 2007. V. 15. P. 1851.
13. Крайский А.А., Крайский А.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. № 2. С. 37. (Kraiski A.A., Kraiski A.V. // Bull. of the Lebedev Physics Institute. 2018. V. 45. Iss. 2. P. 56.)
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Квантовая механика. М.: Наука, 1974. С. 752.
15. Kim Y.E., Kim Y.J., Zubarev A.L., Yoon J.H. // Phys. Rev. C. 1997. V. 55. P. 801.
16. Kim Y.E., Zubarev A.L. Mixtures of Charged Bosons Confined in Harmonic Traps and Bose-Einstein Condensation Mechanism for Low-Energy Nuclear Reactions and Transmutation Processes in Condense Matters // Proceed. Int. Conf. Cold Fusion-II. Marseilles, 2006. P. 711.

About a Possible Wave Mechanism to Increase the Yield of Low-Energy Nuclear Reactions in the Crystal Structures

A. A. Kraiski¹, A. V. Kraiski², *

¹Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, 119333 Russia

²Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: kraiski@sci.lebedev.ru

The possibility of using one of the properties of wave propagation in periodic structures to explain the known effect of increasing of the yield of nuclear DD reactions in crystalline films is considered. The effect is observed when bombarding deuterated metal foil targets with an oxide film in most metals by low-energy deuterons (less than 100 keV): the yield increases many times compared to the expected yield when extrapolating the data obtained for high-energy deuterons. Based on the analogy of the equations describing the propagation of a light wave in a photonic crystal and of a particle through a crystal, the properties of the wave functions of particles in a crystal and of the light field in a photonic crystal are concluded to be analogous. For particles, forbidden zones with transparency windows may exist in the spectrum, their properties are also similar to the properties of windows in a photonic crystal. In these windows, the amplitude of the wave function of a massive particle incident on a crystal may increase, what must be taken into account when considering the increase in the yield of nuclear reactions with the participation of moving particles.

Keywords: nuclear reactions, crystals, increase yield, deuterons.