

Дифракционные структуры, сформированные двумя скрещенными наложенными дифракционными решетками

* С. А. Сергеев, А. Ю. Мешалкин, М. С. Йову

*Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, * e-mail: sersegal@mail.ru*

Поступила 08.04.2020
После доработки 24.05.2020
Принята к публикации 24.05.2020

Изучены дифракционные картины, продуцируемые рельефными структурами, состоящими из двух идентичных скрещенных наложенных дифракционных решеток, сформированных в пленках As_2S_3 с помощью электронно-лучевой записи с последующим химическим травлением. Угол взаимной ориентации дифракционных решеток с периодом 2 мкм изменялся в пределах от 2 до 90°. Для расчета дифракционных картин, продуцируемых парами скрещенных решеток, рассматривались дополнительные дифракционные решетки, сформированные узлами пересечения линий основных решеток. Дифракционная структура с круговой симметрией, состоящая из четырех скрещенных наложенных решеток с равными периодами, рассмотрена как комбинация пар скрещенных наложенных решеток. Получено хорошее совпадение рассчитанных и экспериментально наблюдаемых дифракционных картин.

Ключевые слова: скрещенные решетки, угол между решетками, узлы пересечения линий, дифракционная картина

УДК 535.421

DOI: 10.5281/zenodo.4299754

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционные структуры, сформированные с помощью совмещения нескольких дифракционных элементов, расширяют использование явления дифракции света в устройствах оптоэлектроники. Простейшая дифракционная структура состоит из двух совмещенных прямолинейных дифракционных решеток с постоянными периодами. Пара скрещенных дифракционных решеток впервые была описана в 1874 году Дж. У. Рэлеем в обширной статье, посвященной изготовлению и теории дифракционных решеток [1]. В этой работе показано, что две совмещенные отдельные прямолинейные дифракционные решетки с одинаковыми периодами, направленные под небольшим углом друг к другу, создают муаровую картину, представляющую собой периодическое чередование параллельных светлых и темных полос. Результаты исследований, изложенные в данной статье, положили начало использованию муаровой картины для оптического тестирования объектов.

В первых исследованиях две близко расположенные одна над другой дифракционные решетки могли перемещаться относительно друг друга. Согласно упоминанию в [2] скрещенные решетки такого типа в последний раз были рассмотрены в середине 50-х годов прошлого века в монографии [3], посвященной анализу

качества дифракционных решеток с помощью муаровой картины. В дальнейшем изучались скрещенные решетки, представляющие собой единую дифракционную структуру, состоящую из нескольких наложенных дифракционных решеток. В работе [2] было изучено влияние сдвига двух отдельных рельефно-фазовых дифракционных решеток с прямоугольным профилем относительно друг друга на дифракционные свойства данной структуры. С этой целью были составлены решеточные структуры из двух скрещенных решеток с одинаковыми периодами Λ со сравнительно высокими значениями около 10 и 20 мкм. Сочетание большого периода решеток и малого угла между решетками (от 1 до 10 мрад) позволило получить продолжительные участки структур (до 10 мм), вдоль которых плавно изменялось расстояние между линиями разных решеток. Показано, что при относительном смещении линий разных решеток на $\Lambda/2$ дифракционные пучки преобладающей интенсивности продуцирует обобщенная дифракционная решетка с периодом $\Lambda/2$.

В работе [4] приведено теоретическое исследование дифракционных структур, состоящих из двух наложенных прямолинейных дифракционных решеток в трех возможных вариантах: 1) отличающиеся периоды и одинаковая ориентация; 2) одинаковые периоды и отличающаяся

ориентация; 3) отличающиеся периоды и ориентация. Получено общее выражение для периода муаровой картины структуры двух наложенных решеток (вариант 3), из которого следуют выражения для периодов муаровой картины для первых двух упомянутых вариантов. В работе [5] был проведен анализ структур, состоящих из двух скрещенных дифракционных решеток с одинаковым периодом, с помощью преобразования Фурье. Каждая из решеток при этом рассматривалась как плоская амплитудная решетка с прямоугольным профилем пространственного распределения пропускания. Полученные муаровые картины (терминология авторов) отображают распределение дифракционных пятен в дифракционных картинах, продуцируемых парой скрещенных решеток. Разработанный авторами [6] теоретический метод изучения решеток был применен к рельефной структуре, состоящей из двух ортогонально направленных дифракционных решеток. Были рассчитаны интенсивности дифрагированных пучков в первом порядке дифракции. Теоретические расчеты показали особенности оптических свойств рельефной поверхности с двумерной периодичностью. Так, согласно полученным спектральным кривым, в спектральном диапазоне 0,5–0,7 мкм образец из золота с такой поверхностью (период каждой решетки равен 0,5 мкм) поглощает заметно больше световой энергии, чем образец с гладкой поверхностью. Также теоретически было показано, что указанная рельефная поверхность может выполнять функцию антиотражающего покрытия.

Двойное экспонирование фоторезиста при последовательной голографической записи двух наложенных скрещенных дифракционных решеток приводит к формированию двумерной дифракционной структуры. При этом суммирование экспонирования фоторезиста в узлах пересечения линий скрещенных решеток приводит к заметному отличию скорости растворения фоторезиста в данных областях. Это используется в одном из способов формирования двумерных фотонных кристаллов [7–11]. Если перед записью второй решетки образец поворачивается на 90 или 60°, то с помощью последующего травления образца может быть сформирована структура квадратного либо гексагонального двумерного фотонного кристалла соответственно. В работе [10] проведено моделирование распределения суммарной дозы светового облучения в светочувствительном материале при его двойном и тройном экспонировании. В последнем случае проведено также моделирование рельефных структур гексагонального

фотонного кристалла, сформированных в позитивном фоторезисте. Получено хорошее согласие с экспериментально изготовленными рельефными структурами.

К настоящему времени накоплен опыт в использовании аморфных халькогенидных пленок для формирования дифракционных структур как с помощью прямой оптической и электронно-лучевой записи, так и с помощью фото- и электронно-лучевой литографии. Причем формирование рельефных дифракционных элементов в халькогенидных пленках может быть осуществлено с помощью как позитивного, так и негативного химического травления [12, 13]. В частности, в As содержащих пленках с помощью интерференционной литографии были сформированы рельефные структуры, состоящие из двух ортогонально направленных скрещенных дифракционных решеток с периодом 370 нм [13]. С помощью метода двойного экспонирования и негативного химического травления в пленках As_2S_3 были сформированы гексагональные двумерные фотонные кристаллы с постоянной решетки 550 нм [11]. В данном случае были образованы упорядоченные глубокие лунки в необлученных участках пленки.

В работе [14] показано, что с помощью электронно-лучевой литографии в халькогенидных пленках могут быть сформированы наноразмерные структуры. Например, в пленках сульфида мышьяка были сформированы дифракционные решетки с периодом 30 нм, содержащие глубокие канавки шириной 7 нм. Способность аккумуляции дозы электронного облучения халькогенидными пленками позволила осуществить с помощью единой процедуры травления формирование в пленках $As_{38}S_{18}Se_{44}$ одномерных рельефных дифракционных структур, обладающих сложным профилем [15].

Нами были использованы пленки сульфида мышьяка для электронно-лучевой записи наложенных дифракционных решеток. Ранее [16] были изучены дифракционные структуры, состоящие из двух либо трех однонаправленных наложенных дифракционных решеток с отличающимися значениями периода решетки. Настоящая работа посвящена дифракционным структурам, состоящим из двух скрещенных наложенных решеток, сформированных в пленках сульфида мышьяка с помощью электронно-лучевой записи и химического травления образцов. Были изучены дифракционные картины, продуцируемые двумя идентичными скрещенными дифракционными решетками с различными углами взаимной ориентации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки сульфида мышьяка были получены на стеклянных подложках методом термического испарения и осаждения в вакууме. Толщина пленок составляла около 1,4 мкм. Для стока электрического заряда пленки покрывались полупрозрачным слоем алюминия. Электронно-лучевая запись проводилась в растровом электронном микроскопе BS 300 (Tesla) при ускоряющем напряжении 27 кВ с использованием собственной системы управления электронным пучком. Линейная доза электронного облучения составляла 0,7 мКл/см². Методом последовательного экспонирования были записаны структуры, состоящие из двух ($N = 2$) наложенных дифракционных решеток ДР1 и ДР2 с одинаковым периодом решетки Λ , равным 2 мкм, и отличающейся ориентацией. Угол между направлениями векторов решеток (β) изменялся в пределах 2–90° и выставлялся перед записью второй решетки поворотом образца.

Формирование рельефной поверхности записанных структур осуществлялось с помощью химического травления образцов в водном растворе КОН. Предварительно верхний слой алюминия удалялся в разбавленной соляной кислоте.

Дифракционная эффективность решеток определялась в пропускании в первом порядке дифракции при перпендикулярном падении лазерного пучка ($\lambda = 0,633$ мкм). Ее значение рассчитывалось как отношение интенсивностей дифрагированного и прошедшего рядом с дифракционной структурой пучков.

Поверхность рельефных дифракционных структур изучалась в атомном силовом микроскопе (АСМ). Дифракционные картины, продуцируемые дифракционными структурами, были получены при перпендикулярном падении лазерного пучка ($\lambda = 0,633$ мкм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены АСМ-изображения поверхности дифракционных структур, состоящих из двух наложенных решеток (период каждой равен 2 мкм) с углами взаимной ориентации β , равными 90° (а), 7° (б) и 2° (в).

Темные линии отображают канавки, образованные в облученных участках пленки As_2S_3 в результате химического травления. В случае ортогонально направленных решеток (рис. 1а) образуется упорядоченная структура, характерная для двумерных кристаллов. В этом случае узлы пересечения линий двух наложенных решеток находятся в вершинах

квадратов со стороной, равной периоду дифракционной решетки. Уширение канавок в узлах пересечения линий обусловлено повторным электронным облучением этих областей при записи второй решетки.

Вид поверхности рельефных структур, сформированных при малых углах взаимной ориентации двух наложенных решеток (рис. 1б и 1в), значительно отличается от показанного на рис. 1а. В этом случае даже трудно визуально различить две решетки в общей структуре, а также локализовать узлы пересечений линий решеток. Такие дифракционные структуры состоят из периодически чередующихся областей с различным перекрытием линий разных решеток. Периодическое изменение степени перекрытия линий приводит к образованию муаровой картины на поверхности рельефной структуры. В случае равенства периодов пересекающихся решеток ($\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda$) полосы муара направлены перпендикулярно биссектрисе угла пересечения, а период муара Λ_{moire} , согласно формуле Рэлея [1], равен:

$$\Lambda_{\text{moire}} = \Lambda \left[\frac{\cos(\beta/2)}{\sin \beta} \right]. \quad (1)$$

На рис. 2 приведены изображения области структуры, в которой линии разных решеток наиболее разделены. С уменьшением угла β эта область расширяется в направлении его биссектрисы. На приведенных фрагментах такая область для $\beta = 7^\circ$ (а) и $\beta = 4^\circ$ (б) имеет вид гребенчатого разрыва одиночной решетки.

Для $\beta = 3^\circ$ (в), и особенно для $\beta = 2^\circ$ (нижний участок на рис. 2г), эта область имеет вид одиночной решетки с уменьшенным вдвое ($\Lambda/2$) периодом решетки, что соответствует изложенному в [2].

Структура, состоящая из двух скрещенных наложенных решеток с равными периодами, схематично показана на рис. 3. Рассматриваемая решеточная структура обладает двумерной периодичностью с ромбовидной элементарной ячейкой.

Узлы пересечения линий решеток образуют матрицу пространственно упорядоченных точечных элементов. Через узлы пересечения можно провести линии в различных направлениях. Эквидистантно расположенные параллельные узловые линии формируют дифракционную решетку. В матрице узлов пересечения формируются дифракционные решетки с различными периодами и различной ориентацией, как это показано на рис. 3 для некоторых вариантов.

Узловые линии, формирующие дополнительные решетки, проходят вдоль длинных и коротких диагоналей параллелограммов, состав-

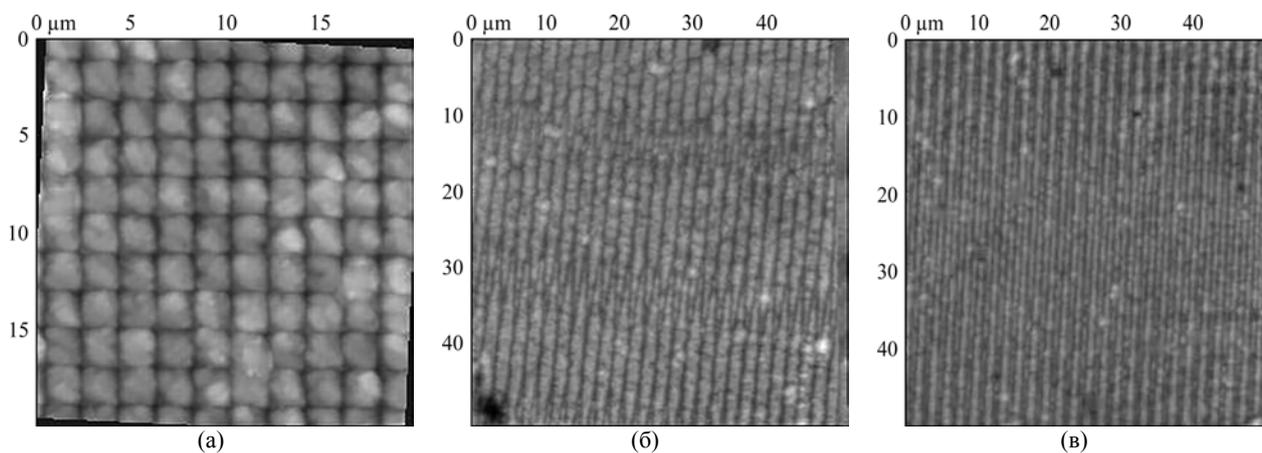


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности структур, состоящих из двух наложенных решеток с углами взаимной ориентации 90° (а), 7° (б) и 2° (в).

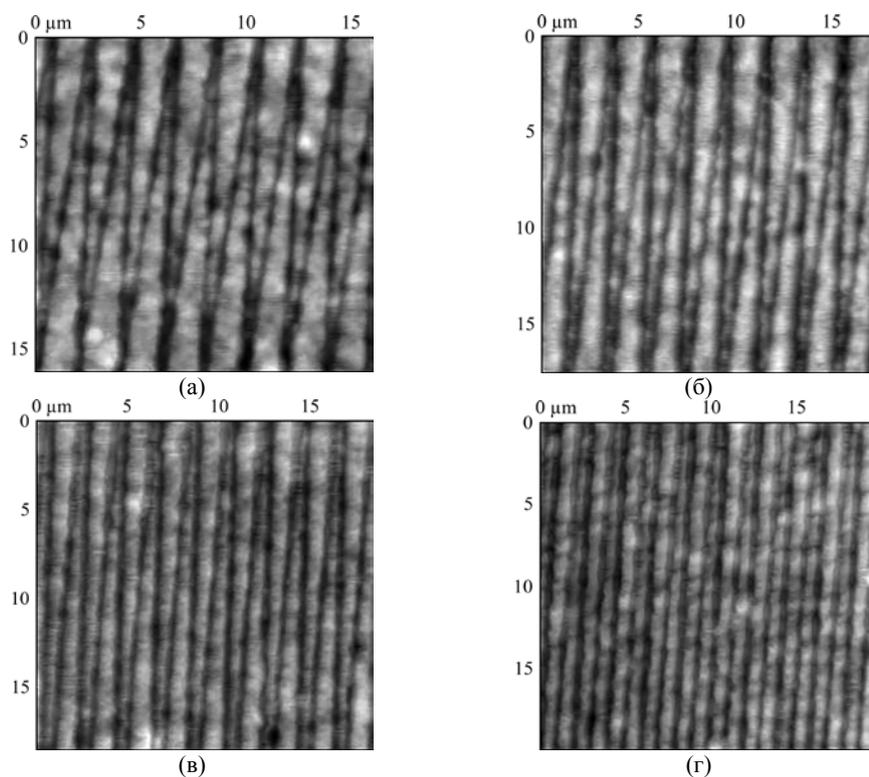


Рис. 2. АСМ-изображения участков наложенных решеток ($N = 2$) с наибольшим разделением линий при углах взаимной ориентации решеток: 7° (а), 4° (б), 3° (в) и 2° (г).

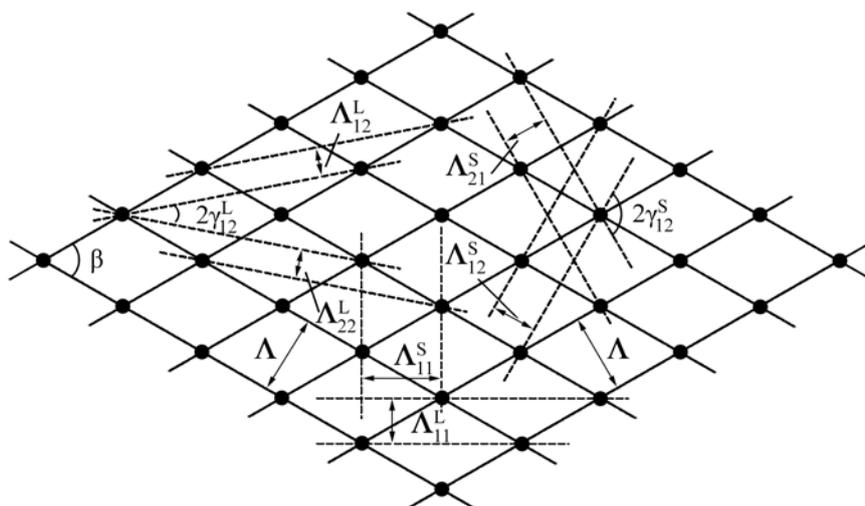


Рис. 3. Схематичное изображение структуры, состоящей из двух скрещенных наложенных дифракционных решеток с равными периодами Λ и углом взаимной ориентации β .

ленных ромбовидными ячейками. Расстояние между соседними узлами пересечения линий вдоль линии каждой решетки равно длине ромба $a = \Lambda / \sin \beta$. Количество таких отрезков (индексы m и n) определяет длины сторон составных параллелограммов. Следует уточнить, что m и n комбинируются так, чтобы диагонали составных параллелограммов не были составными, то есть не содержали узлов пересечения линий. Для этого хотя бы один индекс должен быть нечетным. Также $m \neq n$ за исключением элементарной ромбовидной ячейки, для которой $m = n = 1$.

Периоды решеток, сформированных узловыми линиями, определяются соотношениями:

$$\Lambda_{mn}^S = \frac{\Lambda}{(m^2 + n^2 - 2mn \cos \beta)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\Lambda_{mn}^L = \frac{\Lambda}{(m^2 + n^2 + 2mn \cos \beta)^{1/2}}. \quad (3)$$

Верхний индекс S соответствует направлению узловой линии решетки вдоль короткой диагонали параллелограмма, а индекс L – вдоль длинной. Из этих соотношений следует, что периоды решеток Λ_{mn}^S увеличиваются при уменьшении угла β , а периоды решеток Λ_{mn}^L , наоборот, уменьшаются.

В случае формирования линий дифракционных решеток рядами разделенных точек интенсивность дифрагированного светового пучка уменьшается при увеличении расстояния между точками. Поэтому следует ожидать, что наиболее интенсивными будут дополнительные дифрагированные пучки от решеток, сформированных узловыми линиями с малыми межузельными расстояниями. Именно такие линии дифракционных решеток схематично представлены на рис. 3 пунктирными линиями. В данном случае индексы m и n принимают значения, равные 1 и 2. Дифракционные решетки, сформированные в матрице узлов пересечения, далее будут обозначены как ДР3...ДР8, соответствующие периодам решеток, указанным в скобках: ДР3 (Λ_{11}^S), ДР4 (Λ_{11}^L), ДР5 (Λ_{12}^S), ДР6 (Λ_{21}^S), ДР7 (Λ_{12}^L), ДР8 (Λ_{21}^L).

Прежде всего, близость узлов пересечения реализуется при их расположении в вершинах ромбовидных элементарных ячеек ($m = n = 1$). В этом случае формируются решетки ДР3 и ДР4, узловые линии которых направлены вдоль диагоналей ромбовидной ячейки. Эти решетки, ориентированные взаимно перпендикулярно при любом угле β , определяют оси симметрии дифракционной картины. Периоды этих допол-

нительных дифракционных решеток могут быть определены также соотношениями:

$$\Lambda_{11}^L = \frac{\Lambda}{2 \cos(\beta/2)}, \quad (4)$$

$$\Lambda_{11}^S = \frac{\Lambda}{2 \sin(\beta/2)}. \quad (5)$$

Соотношение (5) тождественно соотношению (1), то есть период Λ_{11}^S как раз и является периодом наблюдаемой муаровой картины.

Следующим по значимости является вариант расположения узлов пересечения в вершинах параллелограммов, составленных двумя ромбовидными ячейками. Это, в первую очередь, решетки с равными периодами ДР5 и ДР6, составленные линиями, проходящими вдоль коротких диагоналей указанных параллелограммов. Далее следуют аналогичные решетки ДР7 и ДР8, составленные линиями, проходящими вдоль длинных диагоналей. В обоих случаях решетки имеют равные периоды, которые из общих соотношений (2) и (3) могут быть представлены как:

$$\Lambda_{12}^S = \Lambda_{21}^S = \frac{\Lambda}{[1 + 4(1 - \cos \beta)]^{1/2}}, \quad (6)$$

$$\Lambda_{12}^L = \Lambda_{21}^L = \frac{\Lambda}{[1 + 4(1 + \cos \beta)]^{1/2}}. \quad (7)$$

Из приведенных соотношений следует, что при малых углах β , для которых $\cos \beta \approx 1$, значения Λ_{12}^S , Λ_{11}^L и Λ_{12}^L слабо зависят от β и составляют примерно Λ , $\Lambda/2$ и $\Lambda/3$ соответственно. В этом случае углы дифракции первого порядка, соответствующие дополнительным дифракционным решеткам, почти совпадают с углами дифракции первого, второго и третьего порядков, соответствующих основному дифракционным решеткам.

Линии, проходящие вдоль диагоналей ромбовидных ячеек, удобно использовать как базисные для определения ориентации дополнительных решеток, сформированных в матрице узлов пересечения. Учитывая структуры с малым углом β , предпочтительнее представляются линии, проходящие вдоль длинных диагоналей ромбовидных ячеек.

Углы между узловой линией дополнительной решетки и длинной диагональю ромба определяются из соотношений:

$$\operatorname{tg} \gamma_{mn}^S = \frac{m+n}{m-n} \times \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad m \neq n, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{mn}^L = \frac{m-n}{m+n} \times \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

в случаях прохождения линий вдоль длинных и коротких диагоналей составных параллелограммов соответственно. Здесь, как и ранее, m и n – количество межузельных расстояний a , определяющее длины составного параллелограмма. Интересно отметить, что ориентация каждой дополнительной решетки не зависит от периода основной решетки. То есть набор ориентаций плоскостей распространения дополнительных дифрагированных пучков зависит только от угла взаимной ориентации основных решеток.

При перпендикулярном падении лазерного пучка углы дифракции дополнительных дифрагированных пучков определяются из соотношений:

$$\sin \phi_{i,mn}^L = \frac{i\lambda}{\Lambda_{mn}^L}, \quad (10)$$

$$\sin \phi_{i,mn}^S = \frac{i\lambda}{\Lambda_{i,mn}^S}, \quad (11)$$

где i – порядок дифракции. Совокупность углов дифракции и соответствующих углов ориентации плоскостей распространения определяет совокупность направлений дифрагированных пучков. Это позволяет смоделировать дифракционную картину, образованную на экране многолучевой дифракцией света, обусловленной в том числе и дифракцией на дополнительных дифракционных решетках.

В качестве примера на рис. 4 приведена дифракционная картина, рассчитанная для случая взаимодействия перпендикулярно падающего лазерного пучка с длиной волны 0,633 мкм с ортогонально направленными ($\beta = 90^\circ$) наложенными дифракционными решетками с периодами, равными 4 мкм.

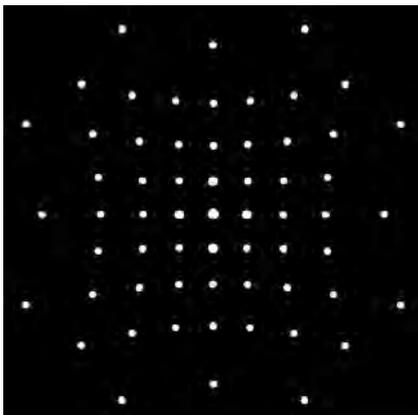


Рис. 4. Рассчитанная дифракционная картина, производимая ортогонально направленными наложенными решетками с периодами $\Lambda = 4$ мкм.

Здесь и далее под дифракционной картиной будет пониматься не полная дифракционная картина, а ее фрагмент. Приведенный на рис. 4 фрагмент ограничен дифракционными максима-

ми четвертого порядка дифракции от основных решеток. Соответствующие дифракционные пятна расположены вдоль горизонтальной и вертикальной осей дифракционной картины. Для расчета параметров дополнительных решеток индексы m и n принимали значения 1, 2 и 3. Рассчитанная дифракционная картина включает в себя дифракционные пятна, соответствующие дифракционным максимумам одного, двух или трех порядков дифракции от дополнительных решеток в зависимости от их периодов.

На рис. 5 приведено сравнение рассчитанной и наблюдаемой дифракционных картин, продуцируемых двумя наложенными решетками с периодами, равными 2 мкм, и углом взаимной ориентации 25° .

На рассчитанной дифракционной картине рядом с дифракционными пятнами первого порядка дифракции указаны периоды основных и дополнительных решеток, производящих соответствующие дифрагированные пучки. Получено хорошее соответствие рассчитанной и наблюдаемой дифракционных картин. Следует заметить, что дифракционные пятна, производимые решетками, которые сформированы линиями, направленными вдоль диагоналей составных параллелограммов, соответствующих сочетаниям значений индексов 1–3 (3–1) и 2–3 (3–2), были едва заметны визуально и не отражены на фотографии.

На рис. 6 показаны дифракционные картины, производимые парами решеток с малыми углами взаимной ориентации.

Дифракционные пятна, аналогичные отмеченным при $\beta = 25^\circ$, наблюдались при уменьшении β вплоть до 3° . При $\beta = 2^\circ$ (рис. 6г) дифракционные пятна первого порядка дифракции от разных решеток вследствие сильного перекрытия сливаются в одно дифракционное пятно. Однако во втором порядке дифракции все же можно различить два дифракционных пятна, соответствующих каждой основной дифракционной решетке. Наличие четких дополнительных дифракционных пятен свидетельствует о двумерной периодичности расположения узлов пересечения линий в сформированных структурах, в том числе и при низких углах β .

Полученные результаты показали, что, как и предполагалось, дополнительные дифракционные пучки заметной интенсивности производятся дополнительными решетками, сформированными узловыми линиями с малыми межузельными расстояниями. В этих случаях индексы m и n принимают значения 1 и 2. Формируются шесть дополнительных решеток, которые можно рассматривать попарно. Узловые

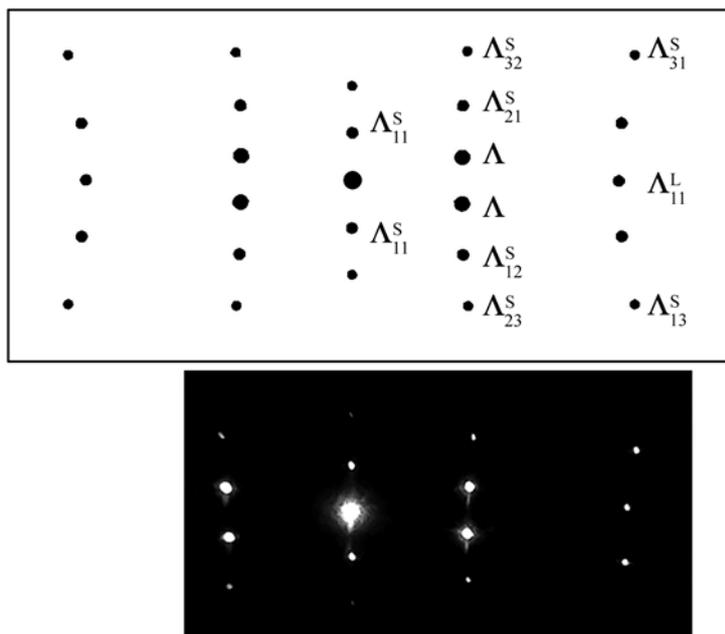


Рис. 5. Рассчитанная (сверху) и наблюдаемая (снизу) дифракционные картины, производимые двумя скрещенными наложенными решетками с периодами, равными 2 мкм, и углом взаимной ориентации 25° .

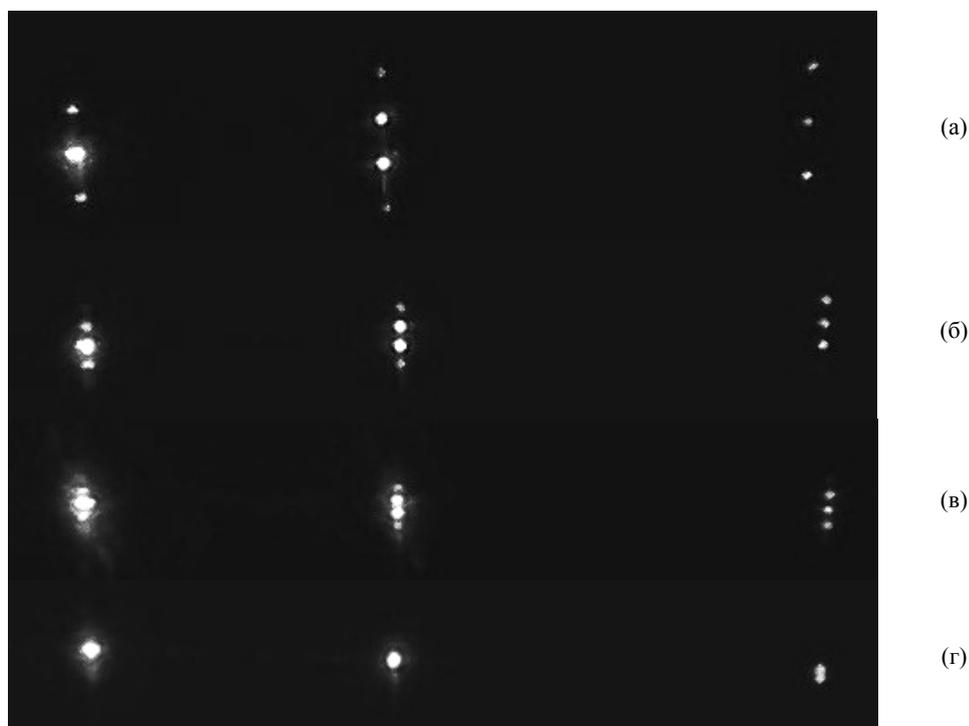


Рис. 6. Дифракционные картины, производимые двумя скрещенными решетками с углами взаимной ориентации: 10° (а), 4° (б), 3° (в) и 2° (г).

линии и соответствующие периоды именно таких решеток схематично показаны на рис. 3. Следует заметить, что уменьшение периода основной решетки сопровождается уменьшением межзельных расстояний. В результате этого, в отличие от рассматриваемой структуры с $\Lambda = 2$ мкм, заметный вклад в дифракционную картину может наблюдаться и от дополнительных решеток, для которых значения индексов m и n больше 2.

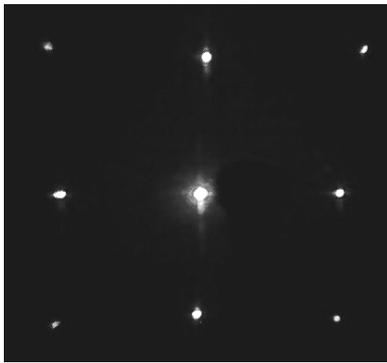
Ниже в таблице приведены значения периодов дополнительных решеток ДР3–ДР8,

а также соответствующие значения углов дифракции первого порядка, рассчитанные для углов взаимной ориентации решеток β в интервале от 2 до 90° . Для пар решеток ДР5–ДР6 и ДР7–ДР8 также приведены рассчитанные значения углов их взаимной ориентации, равные $2\gamma_{12}^S$ и $2\gamma_{12}^L$ соответственно.

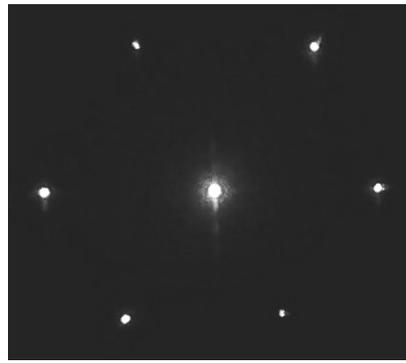
К значениям, приведенным в таблице, следует добавить, что основные дифракционные решетки с периодом 2 мкм продуцируют дифрагированные пучки с углами первого и второго

Таблица. Периоды дополнительных решеток и соответствующие углы дифракции первого порядка ($\lambda = 0,633$ мкм), рассчитанные для различных углов взаимной ориентации решеток β

β (град)	ДР3		ДР4		ДР5, ДР6			ДР7, ДР8		
	Λ_{11}^S (мкм)	$\Phi_{1,11}^S$ (град)	Λ_{11}^L (мкм)	$\Phi_{1,11}^L$ (град)	$\Lambda_{12}^S, \Lambda_{21}^S$ (мкм)	$\Phi_{1,12}^S, \Phi_{1,21}^S$ (град)	$2\gamma_{12}^S$ (град)	$\Lambda_{12}^L, \Lambda_{21}^L$ (мкм)	$\Phi_{1,12}^L, \Phi_{1,21}^L$ (град)	$2\gamma_{12}^L$ (град)
90	1,414	26,59	1,414	26,59	0,894	45,05	143,1	0,894	45,05	36,87
60	2,000	18,45	1,155	33,24	1,155	33,24	120,0	0,756	56,86	21,79
45	2,613	14,02	1,082	35,78	1,357	27,80	102,3	0,715	62,32	15,72
30	3,863	9,43	1,035	37,69	1,614	23,09	77,59	0,687	67,04	10,21
10	11,47	3,16	1,004	39,09	1,942	19,02	29,41	0,669	71,14	3,341
7	16,38	2,22	1,002	39,18	1,971	18,73	20,80	0,668	71,43	2,336
4	28,65	1,27	1,001	39,24	1,9903	18,54	11,96	0,6670	71,62	1,334
3	38,20	0,95	1,000	39,25	1,9945	18,50	8,98	0,6669	71,66	1,000
2	57,29	0,63	1,000	39,26	1,9976	18,47	6,00	0,6668	71,69	0,667



(a)



(б)



(в)

Рис. 7. Дифракционные картины, продуцируемые двумя скрещенными наложенными решетками с углами взаимной ориентации 90° (а) и 60° (б), а также тремя скрещенными наложенными решетками (в).

порядков дифракции, равными $18,45^\circ$ и $39,26^\circ$ соответственно. По данным, приведенным в таблице, отмеченная выше слабая зависимость значений Λ_{11}^L , Λ_{12}^S (Λ_{21}^S), и Λ_{12}^L (Λ_{21}^L) от угла взаимной ориентации решеток выполняется при $\beta \leq 10^\circ$. В то же время период Λ_{11}^S и соответствующий угол дифракции заметно изменяются при уменьшении угла β . В частности, при $\beta = 3^\circ$ угол дифракции составляет всего около 1° . Можно отметить, что при $\beta \leq 10^\circ$ угол взаимной ориентации решеток ДР7 и ДР8 становится меньше 3° и уже при $\beta = 4^\circ$ дифрагированные пучки первого порядка от этих решеток практически не различимы. Решетки ДР5 и ДР6 отличаются сильной зависимостью угла взаимной ориентации от β . Следует заметить, что при периоде основной решетки, равном 2 мкм, во всем интервале изменений угла β период дополнительной решетки Λ_{12}^L (Λ_{21}^L) имеет субмикронный размер и уже при $\beta < 30^\circ$ его величина приближается к длине волны падающего света, равной 0,633 мкм. Это дает сравнительно большой угол дифракции, равный примерно 71° . Поэтому соответствующие дифракционные пятна не отражены на расчетной дифракционной картине при $\beta = 25^\circ$ (рис. 5), хотя и присутствуют на расчетной дифракционной картине

при $\beta = 90^\circ$ (рис. 4). Из соотношений (2) и (3) видно, что периоды дополнительных решеток линейно уменьшаются с уменьшением периода основной решетки. Поэтому, как видно из таблицы, при $\Lambda < 2$ мкм периоды Λ_{mn}^L , за исключением отдельных случаев, имеют субмикронный размер. Так, например, при $\Lambda = 1$ мкм дифракционные максимумы первого порядка будут наблюдаться только от решетки с периодом Λ_{11}^L и лишь при больших углах β .

На рис. 7 приведены центральные области (первый порядок дифракции) дифракционных картин, производимых при перпендикулярном падении лазерного пучка двумя наложенными решетками с $\beta = 90^\circ$ (а) и $\beta = 60^\circ$ (б), а также симметричной структурой, состоящей из трех ($N = 3$) наложенных решеток (в).

При $\beta = 60^\circ$ значение периода дополнительной решетки Λ_{11}^S совпадает со значением периода основной решетки $\Lambda = 2$ мкм, причем направления соответствующих дополнительных дифрагированных пучков в первом порядке дифракции соответствуют направлениям дифрагированных пучков от одной из трех ($N = 3$) наложенных решеток. Вследствие этого центральные области дифракционных картин, производимых двумя и тремя наложенными

решетками, являются тождественными, что видно на рис. 7б и 7в.

Дифракционная эффективность наложенных решеток, рассматриваемых в данной статье, оказалась примерно в два раза ниже дифракционной эффективности одиночной решетки, равной около 20%. Во всем интервале изменения β в пределах 2–90° значения дифракционной эффективности наложенных решеток в первом порядке дифракции колебались от 8 до 9%. Слабую зависимость дифракционной эффективности от угла β можно объяснить тем, что при уменьшении β наряду с удлинением областей пересечения линий происходит увеличение расстояния между ними.

При формировании дифракционных структур, состоящих из более чем двух скрещенных наложенных дифракционных решеток, могут возникнуть узлы пересечения более чем двух линий, например трех либо четырех. Вне зависимости от вероятности пересечения в одном узле более двух линий, узлы пересечения двух линий формируются непременно, и соответствующая матрица узлов может считаться основной. (Особым случаем является структура, состоящая из трех скрещенных наложенных решеток, в которой все узлы пересечения могут быть узлами пересечения трех линий.) С этой точки зрения структуру, состоящую из N наложенных дифракционных решеток, можно рассматривать в виде совокупности пар скрещенных наложенных дифракционных решеток. Количество комбинаций основных решеток попарно определяется сочетанием:

$$C_k^N = \frac{N!}{(N-k)!k!}, \text{ где } k = 2. \quad (12)$$

При таком подходе множество дополнительных дифракционных решеток, сформированных в суммарной матрице узлов пересечения двух линий, можно представить в основном как совокупность дополнительных дифракционных решеток, сформированных узловыми линиями в каждой из пар наложенных решеток. Исходя из этого можно определить направления распространения дополнительных дифрагированных пучков, продуцируемых группой N , наложенных решеток с различной ориентацией.

На основании выдвинутых предположений были рассчитаны параметры (периоды и ориентация) дополнительных дифракционных решеток, сформированных в матрице узлов пересечения двух линий, для дифракционной структуры с круговой симметрией, состоящей из четырех скрещенных наложенных решеток, период каждой равен 2 мкм. Согласно (12) при $N = 4$ образуются шесть пар основных решеток.

Четыре из них с углом взаимной ориентации 45° и две с углом 90°.

На рис. 8 для сравнения сведены вместе фрагменты экспериментально наблюдаемой (верхняя часть) и рассчитанной (нижняя часть) дифракционных картин, производимых указанной дифракционной структурой. Следует заметить, что в рассматриваемой дифракционной структуре в ряде случаев ориентация дополнительной решетки совпадает с ориентацией основной решетки. В паре однонаправленных дифракционных решеток с различными периодами образуется дополнительная дифракционная решетка с периодом пространственных биений. Соответствующие дифракционные пятна также были учтены в рассчитанной дифракционной картине.

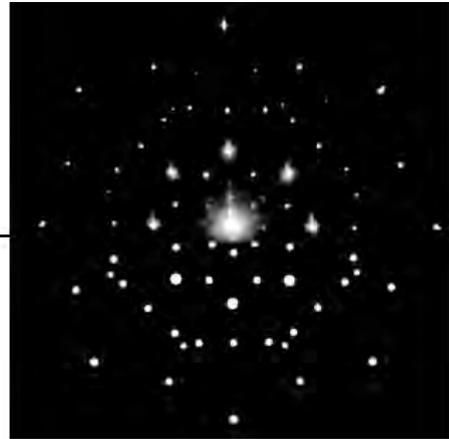


Рис. 8. Экспериментально наблюдаемая (сверху) и рассчитанная (снизу) дифракционные картины, производимые структурой, состоящей из четырех скрещенных наложенных решеток с периодами $\Lambda = 2$ мкм.

Наиболее яркие дифракционные пятна на рис. 8 соответствуют дифракционным пучкам первого порядка, производимым четырьмя основными решетками. Как видно, рассчитанная дифракционная картина хорошо совпадает с наблюдаемой экспериментально. Это подтверждает предположение о преобладающем вкладе в формирование дополнительных решеток матрицы узлов пересечения двух линий, а также правомерность представления структуры $N > 2$ наложенных решеток с помощью комбинирования пар наложенных решеток. Следует заметить, что на наблюдаемой дифракционной картине присутствуют также слабые дифракционные пятна, не продуцируемые ни одной из рассматриваемых пар решеток. Происхождение соответствующих дифрагированных пучков, по-видимому, связано с дополнительными решетками, сформированными узловыми линиями, присущими только совокупной матрице узлов пересечения. Следует заметить, что вклад таких дифрагированных пучков в дифракционную картину незначителен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью электронно-лучевой записи и последующего химического травления в пленках сульфида мышьяка сформированы рельефные структуры, состоящие из двух скрещенных наложенных дифракционных решеток с периодами, равными 2 мкм, и углами взаимной ориентации в интервале от 2 до 90°.

Сравнение рассчитанных и наблюдаемых дифракционных картин показало, что в случае взаимодействия падающего пучка света с указанными дифракционными структурами наблюдаемые дополнительные дифрагированные пучки обусловлены дифракцией света на группе дифракционных решеток, сформированных узловыми линиями в матрице узлов пересечения двух линий. Установлено, что заметный вклад в дополнительную дифракцию света вносят решетки, образованные узловыми линиями с малыми межузельными расстояниями.

Показано, что дифракционную структуру, состоящую из более, чем двух разнонаправленных наложенных решеток, можно представить в виде комбинации пар скрещенных решеток. В этом случае отмечалось хорошее совпадение рассчитанной и наблюдаемой дифракционных картин. Таким образом, подтверждено, что в дифракционной структуре, состоящей из группы разнонаправленных наложенных прямолинейных дифракционных решеток, основной вклад в формирование дополнительных решеток вносят узлы пересечения двух линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lord, Rayleigh, On the manufacture and theory of diffraction gratings, *Philos. Mag.*, 1874, vol. 47, no. 81–93, p. 193.
2. Willie S., Rockward and Donald, C. O'Shea, Crossed phase gratings with diffractive optical elements, *Appl. Opt.* 1998, vol. 37, no. 22, p. 5075.
3. Guild, J., *The interference systems of crossed diffraction gratings: theory of moiré fringes*, The Clarendon Press, Oxford, 1956. 152 p.
4. Creath, K. and Wyant, J.C., *Moiré and Fringe Projection Techniques. Optical Shop Testing*, Second Edition, Edited by Daniel Malacara. John Wiley & Sons, Inc., 1992. pp. 653–685.
5. Krumm, John, Shafer, Steven A., Sampled-grating and crossed-grating models of moiré patterns from digital imaging, *Opt. Eng.*, 1991, vol. 30, no. 2, p. 195.
6. Derrick, G.H., McPhedran, R.C., Maystre, D., and NeviOre, M., Crossed Gratings: A Theory and its Applications, *Appl. Phys.*, 1979, vol. 18, p. 39.
7. Fernandez, A., Decker, J.Y., Herman, S.M., Phillion, D.W., et al., Methods for fabricating arrays of holes using interference lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1997, vol. 15, no. 6, p. 2439.
8. Ngoc Diep, Lai, Wen Ping, Liang, Jian Hung. Lin, Chia Chen, Hsu, et al., Fabrication of two- and three-dimensional periodic structures by multi-exposure of two-beam interference technique, *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 23, p. 9605.
9. Quiñónez, F., Menezes, J.W., Cescato, L., Rodriguez-Esquerre, V.F., et al., Band gap of hexagonal 2D photonic crystals with elliptical holes recorded by interference lithography, *Opt. Express*, 2006, vol. 14, no. 11, p. 4873.
10. Menezes, J.W. and Cescato, L., de Carvalho, E.J. and Braga, E.S., Recording different geometries of 2D hexagonal photonic crystals by choosing the phase between two-beam interference exposures, *Opt. Express*, 2006, vol. 14, no. 19, p. 8578.
11. Feigel, A., Veinger, M., Sfez, B., Arsh, A., et al., Two dimensional photonic band gap patterning in thin chalcogenide glassy films, *Thin Solid Films*, 2005, vol. 488, p. 185.
12. Stronski, A.V., *Microelectronic Interconnections and Assembly*, NATO ASI. Ed. 3. High Technology. Eds. G. Harman, P. Mach. Dordrecht: Kluwer, 1998, vol. 54, pp. 263–293.
13. Vlček, Mir., Schroeter, S., Čech, J., Wágner, T., et al., Selective etching of chalcogenides and its application for fabrication of diffractive optical elements. *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, vols. 326&327, p. 515.
14. Neilson, J.R., Kovalskiy, A., Vlček, M., Jain, H., et al. Fabrication of nano-gratings in arsenic sulphide films, *J. Non-Cryst. Solids*. 2007, vol. 353, p. 1427.
15. Kolbjonoks, V., Gerbreder, V., Teteris, J., Gerbreder, A., Optical grating recording in ChG thin film by electron beam, *J. Non-Cryst. Solids*, 2013, vol. 377, p. 169.
16. Sergeev, S.A., Iovu, M.S., Meshalkin, A.Yu., Superimposed equally oriented diffraction gratings formed in As₂S₃ films, *Chalcogenide Lett.*, 2020, vol. 17, no. 1, p. 25.

Summary

The diffraction patterns of surface relief diffraction structures that consisted of two crossed identical superimposed gratings formed in As₂S₃ thin films by electron beam recording with subsequent chemical etching were studied. The angle between gratings with a grating period of 2 μm was varied between 2° and 90°. Additional diffraction gratings formed by a set of lines intersection nodes were considered for simulation of diffraction patterns. Diffraction structure composed of four identical crossed gratings was considered as combination of pairs of crossed gratings to calculate the diffraction pattern from it. A good agreement between experimental diffraction patterns and modeling ones was confirmed by the used method of calculation.

Keywords: crossed gratings, angle between gratings, line intersection nodes, diffraction pattern