

07

Два механизма взаимодействия света с фазовой дифракционной решеткой

© Д.В. Мягков, В.Э. Грикуров, С.И. Нестеров, Е.Л. Портной

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Институт физики С.-Петербургского государственного университета
E-mail: myagkov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 июня 2006 г.

Предложено применение дифракционных решеток, используемых в качестве антиотражающего покрытия оптической поверхности для дифракционного ввода света в активную область оптоэлектронных приборов. С помощью численного моделирования исследована зависимость дифракционной эффективности от высоты штриха решетки, уменьшающей отражение от оптической поверхности и одновременно формирующей дифракционный порядок в материале.

PACS 78.20.Bh

Дифракционная решетка на входном окне оптоэлектронного прибора может использоваться в двойном качестве. Во-первых, для уменьшения отражения от оптической поверхности, во-вторых, для повышения эффективности фотопреобразования. В качестве просветляющего покрытия обычно применяется периодическая структура, не формирующая дифракционных порядков, что позволяет рассматривать ее как антиотражающий слой с эффективным коэффициентом преломления, который можно найти, воспользовавшись теорией эффективной среды [1]. Повышение эффективности фотопреобразования достигается с помощью дифракционного ввода света в активную область прибора, что позволяет увеличить длину взаимодействия света с активной областью фотоэлектронного прибора за счет направления части света под углом к поверхности (рис. 1). Экспериментальные исследования показали, что создание периодического рельефа на поверхности светодиодной структуры ведет к увеличению эффективности вывода излучения на 30% [2].

В данной работе исследуется возможность создания дифракционной решетки, обладающей сразу двумя вышеназванными свойствами. Такая

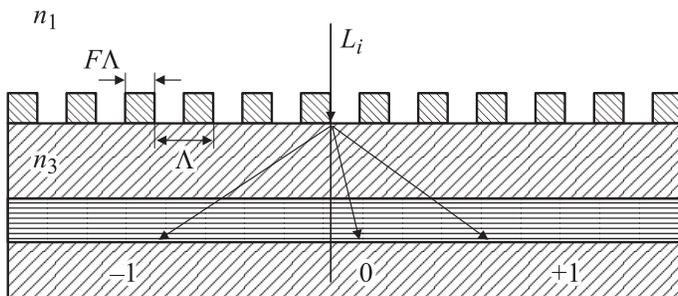


Рис. 1. Поперечное сечение дифракционной решетки, сформированной на входном окне оптоэлектронного прибора, L_i — падающий свет.

решетка позволит не только пропускать максимум излучения в прибор, но и направлять его часть под углом к поверхности. Для уменьшения отражения в воздух требуется периодическая структура, которая не формирует дифракционных порядков в воздухе и одновременно создает дифракционный порядок в материале, что становится возможным за счет уменьшения длины волны света в материале прибора, поскольку полупроводниковые материалы обладают большими показателями преломления. В таком случае можно одновременно уменьшить отражение света в воздух с помощью подбора ширины штриха для создания деструктивной интерференции в воздухе и направить часть прошедшего в материал света под углом к поверхности за счет дифракции.

Постоянное совершенствование технологии, в частности за счет применения интерференционной литографии [3,4], позволяет ожидать существенного упрощения, удешевления и, следовательно, более широкого применения дифракционных решеток. Таким образом, создание дифракционной решетки, не только уменьшающей отражение от поверхности, но и направляющей максимальное количество света под углом к ней, имеет важное прикладное значение.

Поиск оптимальных параметров дифракционной решетки, обладающей наименьшим отражением и направляющей максимум света в первый дифракционный порядок, был начат с рассмотрения наиболее технологичной для производства дифракционной решетки с прямо-

угольным профилем. Был рассмотрен самый простой случай, когда на решетку нормально падает ТЕ поляризованный свет. Дифракционная решетка не формирует дифракционных порядков в воздухе и дает низшие дифракционные порядки в материале прибора, если период решетки Λ удовлетворяет следующему условию: $\frac{\lambda_0}{n_3} < \Lambda < \frac{\lambda_0}{n_1}$ (λ_0 — длина волны света в воздухе, n_3 — показатель преломления материала, из которого изготовлена решетка, n_1 — показатель преломления среды, из которой падает свет на решетку (см. рис. 1). Исходя из теории эффективной среды, можно определить высоту штриха и коэффициент заполнения для уменьшения отражения в воздух. Эффективный коэффициент преломления решетки в случае ТЕ поляризации

$$n_2^{TE} = [\varepsilon_2^{TE}]^{1/2} = [n_1^2(1 - F) + n_3^2F]^{1/2}, \quad (1)$$

где n_1 — показатель преломления воздуха, n_2 — эффективный показатель преломления решетки, n_3 — показатель преломления материала, из которого изготовлена решетка, F — коэффициент заполнения (рис. 1). Коэффициент заполнения необходимо подобрать так, чтобы выполнялось условие согласования коэффициентов преломления: $n_2 = (n_1 n_3)^{1/2}$ между воздухом и решеткой, решеткой и материалом прибора. На основании формулы (1) и этого условия имеем:

$$F = \frac{n_3}{n_1 + n_3}.$$

Толщина просветляющего слоя — $d_{AR} = \frac{\lambda_0}{4n_2} p$, $p = 1, 3, 5, \dots$, при которой достигается минимум отражения, n_2 — эффективный показатель преломления периодической структуры (рис. 1). Таким образом, все необходимые для численного расчета эффективности дифракции параметры (длина волны, геометрия профиля штриха, угол падения, коэффициент преломления, поляризация, высота штриха и коэффициент заполнения) фиксированы. Распределение интенсивности между первым и нулевым порядками в прошедшем свете позволит выяснить, куда пойдет наибольшая часть прошедшего сквозь решетку света.

Для расчета дифракционной эффективности был выбран численный метод, основанный на решении уравнения Гельмгольца в ограниченной области с искусственными краевыми условиями [5,6].

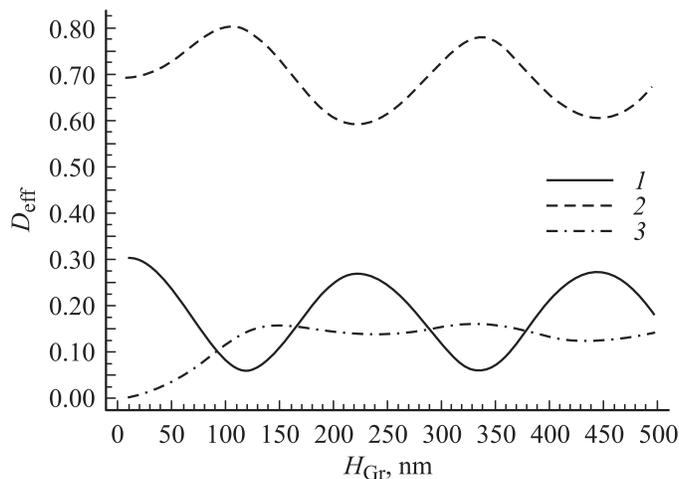


Рис. 2. Зависимости дифракционной эффективности D_{eff} различных порядков дифракции от высоты штриха H_{Gr} дифракционной решетки (длина волны — $1.06 \mu\text{m}$, коэффициент преломления $n = 3.5$, период — 340 nm , нормальное падение, ТЕ поляризация, не учитывается поглощение, ширина штриха — 75 nm). 1 — отраженный свет; 2 — нулевой порядок в прошедшем свете, 3 — первый порядок в прошедшем свете.

Результат численного расчета зависимости эффективности дифракции от высоты штриха представлен на рис. 2. Зависимость эффективности дифракции от высоты штриха имеет периодический характер, период и положения минимумов интенсивности отраженного света соответствуют теории эффективной среды. Следовательно, можно говорить о ее применимости для объяснения уменьшения отражения от поверхности, на которую нанесена периодическая структура, не только в случае полного отсутствия дифракционных порядков, но также и в случае наличия дифракционных порядков в материале. При этом основная часть прошедшего в материал света остается в нулевом порядке (рис. 2). Отражение от поверхности также не достигает значений, приведенных в литературе [7,8].

Таким образом, с помощью численного моделирования была исследована зависимость дифракционной эффективности от высоты штриха

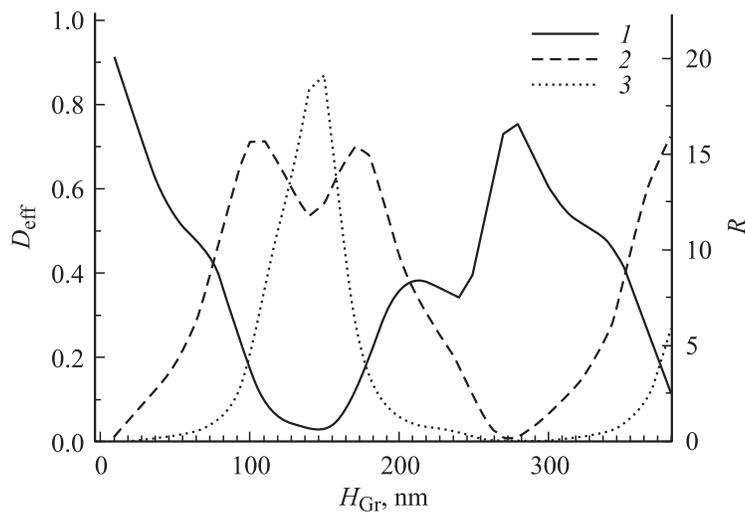


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности излучения D_{eff} , прошедшего в материал света от высоты штриха H_{Gr} дифракционной решетки, изготовленной из халькогенидного стекла, сформированной на поверхности кварцевого стекла (период — 700 nm, коэффициент заполнения — 0.5, длина волны — 442 nm, показатель преломления халькогенидного стекла — 2.5, падение нормальное, ТЕ поляризация, профиль штриха — прямоугольный). 1 — нулевой порядок, 2 — первый порядок, 3 — отношение интенсивностей первого и нулевого порядков (R).

прямоугольной решетки, параметры которой были рассчитаны исходя из модели эффективной среды. Рассмотрена простейшая дифракционная решетка, которая не только уменьшает отражение от оптической поверхности, но и направляет часть прошедшего в материал света под углом к поверхности за счет дифракции. Показано, что основная часть света проходит в нулевой порядок. Однако расчеты для дифракционных решеток, имеющих большее количество дифракционных порядков, показали, что возможно изготовить решетку, интенсивность первого порядка которой в 20 раз больше интенсивности нулевого порядка прошедшего света (рис. 3), что значительно увеличивает эффективность оптоэлектронных приборов.

Список литературы

- [1] *Brundet D.L., Glystys E.N., Gaylord T.K.* // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. N 13. P. 2695–2706.
- [2] *Ishimori M., Kanamori Y., Sasaki M., Hane K.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2002. V. 41. P. 4346–4349.
- [3] *Pfeffer M.* // *Europhotonics.* 2003. Oct/Nov 03. P. 34–35.
- [4] *Nesterov S.I., Myagkov D.V., Portnoi E.L.* // *International journal of nanoscience.* 2004. V. 3. N 1& 2. P. 59–64.
- [5] *Grikurov V.E., Heikkola E., Neittaanmaki P., Plamenevskii B.A.* // *Numerische Mathematik.* 2003. V. 94. P. 269–288.
- [6] *Grikurov V.E.* Proceedings of the First East-West Workshop on Advanced Techniques in Electromagnetics 2004. Warsaw, May 20–21. [quant-ph/0406019].
- [7] *Heine K., Morf R.H.* // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. N 14. P. 2476–2482.
- [8] *Enger R.C., Case K.* // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. N 20. P. 3220–3228.