

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ МЭМС РЕШЕТОК

Андрей Михайлович Белкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, главный специалист - оптик, тел. (383)330-79-86, e-mail: belkin@iae.nsk.su

Эдуард Геннадьевич Косцов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, зав. лаб., тел. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Рассмотрено влияние параметров отражательных МЭМС решеток на их дифракционную эффективность. Выполнено сравнение характеристик решеток прямоугольного и ступенчатого профиля.

Ключевые слова: дифракционная решетка, МЭМС, дифракционная эффективность.

OPTICAL PROPERTIES OF REFLECTING MEMS DIFFRACTION GRATINGS

Andrey M. Belkin

Institute of Automation and Electrometry (SB RAS), 630090, Russia, 1 Acad. Koptuyuga, Novosibirsk, principal optical engineer, tel. (383)330-79-86, e-mail: belkin@iae.nsk.su

Eduard G. Kostsov

Institute of Automation and Electrometry (SB RAS), 630090, 1 Acad. Koptuyuga, Novosibirsk, Dr.Sc., lab chief, tel. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Reflecting MEMS diffraction gratings parameters influence on their diffraction efficiency is discussed. Performances of stepped profile gratings and rectangular profile gratings are compared.

Key words: diffraction grating, MEMS, diffraction efficiency.

Среди многообразия оптических микроэлектромеханических (МЭМС) устройств привлекают особое внимание дифракционные МЭМС (ДМЭМС), которым свойственны малые габариты, низкая управляющая мощность и высокая скорость переключения между рабочими состояниями. ДМЭМС используются в качестве оптических затворов, аттенюаторов, мультиплексоров, коммутаторов и переключателей каналов оптических линий связи [1,2].

Применяемые в настоящее время ДМЭМС по принципу действия являются аналогами традиционных дифракционных решеток с прямоугольным, симметричным относительно нормали к плоскости решетки, профилем штриха [3]. Как следствие, в них присутствуют симметричные порядки дифракции (-1 и +1, -2 и +2 итд). Дифрагированное излучение распределено нерационально, среди нескольких порядков дифракции, при этом в единственный выделенный порядок поступает лишь ~40% энергии падающего излучения. Вносимые потери энергии являются одной из ключевых характеристик устройств управления

оптическим излучением, поэтому невысокая дифракционная эффективность (ДЭ) в выделенном порядке является существенным недостатком устройств подобного типа [2].

В настоящей работе рассмотрена возможность построения ДМЭМС устройства, подобного классической отражательной решетке с "блеском", применяемой для концентрации дифрагированного излучения в единственный выделенный порядок дифракции [4]. Различие между таким устройством и классической решеткой заключается в том, что наклонный штрих формируется в ДМЭМС устройстве ступенчатой последовательностью плоских отражающих элементов - микробалок, упорядоченно расположенных на различных расстояниях относительно базовой плоскости.

На основе численного моделирования исследовано влияние межэлементного зазора на ДЭ в выделенном порядке дифракции для вариантов с различным числом элементов на период, определены источники энергетических потерь в устройстве.

Конфигурации устройства схематично представлены на рис. 1.

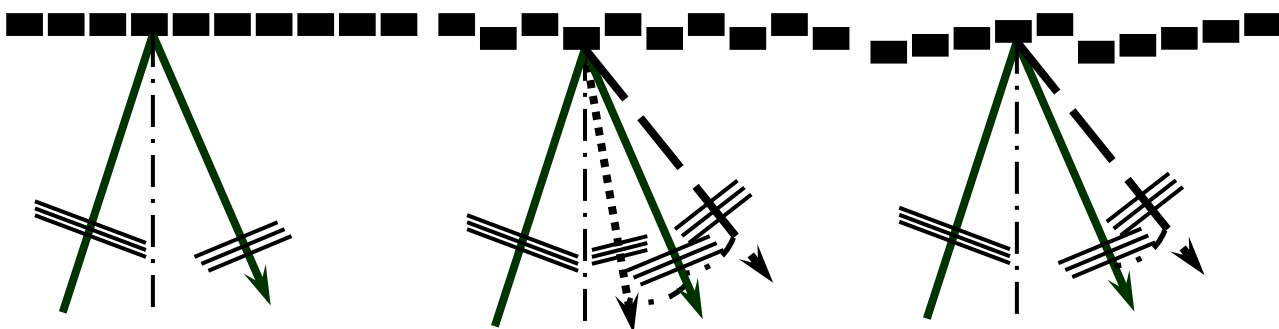


Рис. 1а

Рис. 1б

Рис. 1в

Плоская волна монохроматического излучения падает на дифракционную решетку, образованную металлическими отражающими элементами, выполненными в виде полосок, разделенных зазором. Длинная сторона полосок перпендикулярна плоскости рисунка. Предполагается, что направление распространения падающей волны лежит в плоскости рисунка и перпендикулярно длинной стороне полосок, таким образом, направления распространения дифрагированных волн находятся также в плоскости рисунка. Угол дифракции определяется периодом решетки и длиной волны света [3, 4].

В одном из предельных положений полоски лежат в одной плоскости (рис. 1а), при этом устройство работает подобно плоскому зеркалу. В другом предельном положении (рис. 1в) полоски упорядоченно расположены параллельно друг другу на различной высоте над базовой плоскостью, образуя ступенчатую конфигурацию, обеспечивающую преимущество +1-му порядку дифракции. Оптимальная высота h_0 над базовой плоскостью максимально удаленной от нее полоски при малых углах падения и дифракции вычисляется как $h_0 \sim 0.5 \lambda (N-1)/N$, где N – число элементов (полосок) на период.

Предполагалось, что падающее излучение с длиной волны 0.6 мкм имеет линейную поляризацию, вычисления выполнялись для ТЕ поляризации. Угол падения света был равен нулю (нормальное падение). Суммарная ширина металлической полоски и межэлементного зазора выбиралась с учетом технологических соображений и принималась равной 6.0 мкм, толщина полоски равна 0.4 мкм. На основе выполненных ранее оценок в качестве материала полосок было выбрано серебро [5]. Для вычислений использовались справочные данные [6].

При расчете характеристик ДМЭМС наиболее часто применяют упрощенную (скалярную) теорию дифракции. С ее помощью, однако, невозможно корректно рассчитать оптические свойства токопроводящих структур, имеющих конструктивные элементы размером менее длины волны света [7]. В настоящей работе вычисления выполнялись с использованием алгоритма на основе модового метода [8], что позволяет получить более точные оценки, важные на текущем этапе определения потенциальных возможностей рассматриваемых ДМЭМС.

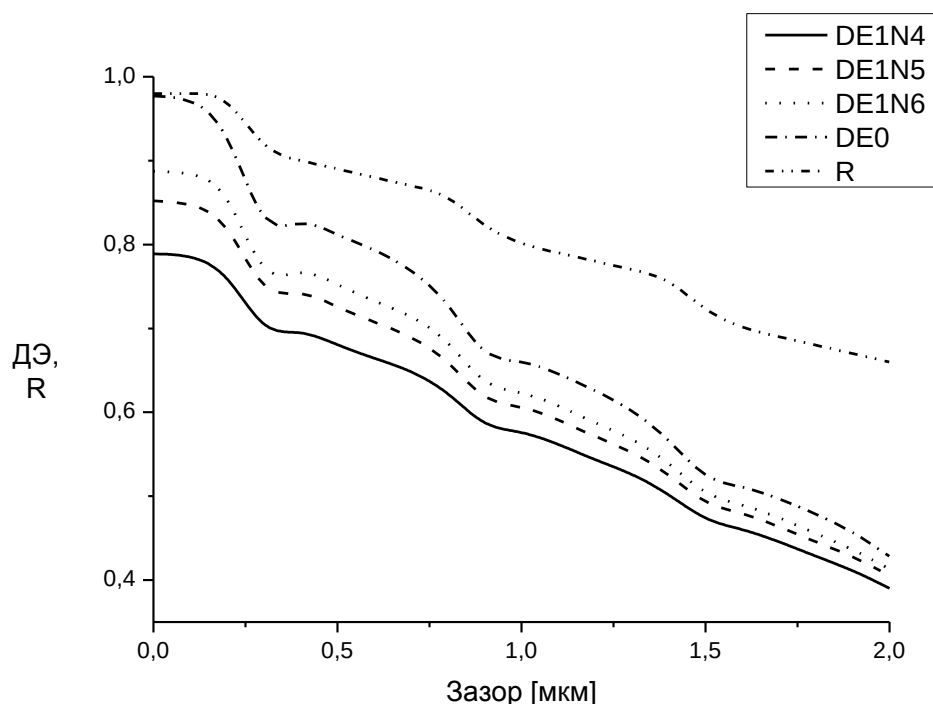


Рис. 2. Зависимость ДЭ в выделенном порядке от величины межэлементного зазора для решетки с «блеском»

На рис. 2 представлена зависимость ДЭ в выделенном +1-ом порядке дифракции от величины межэлементного зазора для вариантов с 4 (DE1N4), 5 (DE1N5) и 6 (DE1N6) элементами на период (см. также рис. 1в). Период решетки равен 24, 30, и 36 мкм для 4, 5, и 6 элементов на период, соответственно. Кроме того, на рис. 2 дополнительно представлены зависимости от величины зазора ДЭ в 0-м порядке дифракции (DE0), соответствующем зеркальному отражению от плоскости решетки, для предельного положения элементов, изображенного на рис. 1а, а также полного энергетического коэффициента отражения R решетки.

Приведенные зависимости позволяют сделать ряд выводов. Прежде всего, следует отметить, что достижение ДЭ в выделенном порядке дифракции вдвое и более превосходящей по величине аналог с прямоугольной, симметричной формой штриха (см. рис. 1б) практически осуществимо при вполне разумном числе элементов на период. Если проектируемое устройство (например, оптический затвор) необходимо оптимизировать на наименьшие энергетические потери света, в качестве рабочего положения, соответствующего «включенному» состоянию следует выбирать конфигурацию, изображенную на рис. 1а (кривая DE0 на рис.2). Если же есть необходимость оптимизации на максимальное значение контраста при переходе от «включенного» состояния к «выключенному», в качестве рабочего положения, соответствующего «включенному» состоянию следует предпочесть конфигурацию, изображенную на рис.1в (кривые DE1N4, DE1N5, DE1N6 на рис. 2). Особый интерес представляют варианты с малыми ($\sim 0.1 \dots 0.2$ мкм) зазорами, при которых энергетические потери света минимальны (при этом решетка является непрозрачной). При достаточно большой величине зазора полный энергетический коэффициент отражения решетки пропорционален отношению площади отражающей поверхности к полной площади решетки или, другими словами, отношению ширины полосы к сумме ширины полосы и величины межэлементного зазора. Как можно видеть на рис. 2, дифракционная эффективность в выделенном порядке с увеличением зазора убывает быстрее, чем полный энергетический коэффициент отражения. Причина этого заключается в том, что при увеличении зазора снижается эффективность концентрации энергии в выделенном порядке дифракции за счет перераспределения энергии между выделенным и паразитными порядками. Расчет показывает, что даже при нулевом зазоре часть отраженной энергии уходит в паразитные порядки, а при увеличении зазора наблюдается рост ДЭ в паразитных порядках. Следует отметить рост ДЭ в выделенном порядке и соответствующее снижение ДЭ в паразитных порядках при увеличении числа элементов на период, то есть при более качественной аппроксимации наклонного профиля штриха полосками, образующими ступенчатую структуру.

Для сравнения на рис.3 представлена зависимость ДЭ в выделенном порядке от величины межэлементного зазора для решетки с прямоугольным профилем штриха (см. рис. 1б). Период решетки равен 12 мкм, прочие параметры аналогичны принятым для вычисления зависимостей, приведенных на рис. 2. Для большей наглядности, кроме собственно ДЭ в +1 порядке (DE1N2), на рис. 3 приведены суммарная ДЭ для +1 и -1 порядков (DE1N2x2), ДЭ в +1 порядке для решетки с «блеском» (4 элемента на период) (DE1N4) и полный энергетический коэффициент отражения R решетки. Как видно, с увеличением зазора относительная деградация характеристик (падение ДЭ) идет более быстро для решетки с «блеском» по сравнению с решеткой с прямоугольным штрихом. Таким образом, для наиболее полной реализации потенциальных

преимуществ ступенчатых конфигураций «с блеском» критически важно обеспечить малый межэлементный зазор.

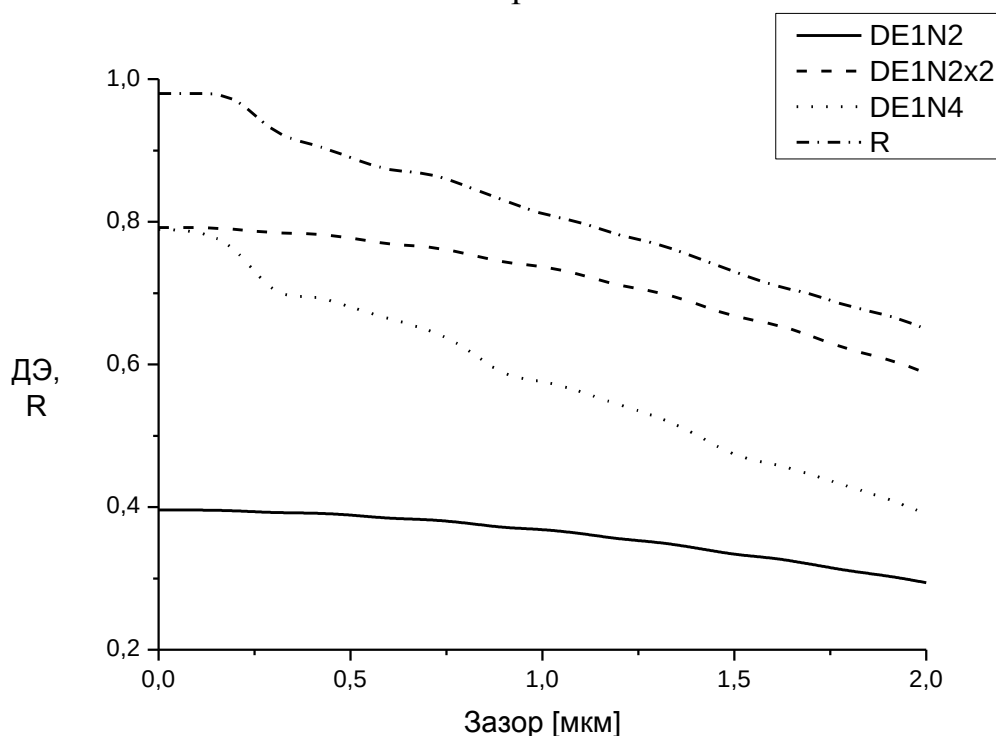


Рис. 3. Зависимость ДЭ в выделенном порядке от величины межэлементного зазора для решетки прямоугольного профиля

Анализ оптических свойств рассмотренных конфигураций указывает на возможность создания на их основе перспективных ДМЭМС устройств, превосходящих по своим характеристикам существующие решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu M. C., Solgaard O. and Ford J. E. Optical MEMS for Lightwave Communication // J. Lightwave Technol. - 2006. - V. 24. - P. 4433-4454.
2. Verheggen, J. P., Khan-Raja W., Castracane J. Optimization of diffractive MEMS for optical switching // Journ. Exp. Nanosci. - 2007. - V. 2. - № 1–2. - P. 87–100.
3. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. М.: Машиностр., 1974.
4. Palmer C. Diffraction Grating Handbook. Newport Corp., 2005.
5. Белкин А.М., Косцов Э.Г., Соболев В.С. Численное моделирование дифракционной эффективности ступенчатых МЭМС решеток // Доклады конференции: Фундаментальные основы МЭМС и нанотехнологий. IV Всерос. конференция, Новосибирск, 6-8 июня 2012 г. - вып. 4. - с. 75-80.
6. Hass G. Optical constants of metals // American Institute of Physics Handbook. Mc-Graw Hill. – 1957. - P. 6–104.
7. Gremaux D.A., Gallagher N.C. Limits of scalar diffraction theory for conducting gratings // Applied Optics. - 1993. - V. 32. - № 11. - P. 1948-1953.
8. Lin Chung-Hsiang, Leung K. Ming, Tamir T. Modal transmission-line theory of three-dimensional periodic structures with arbitrary lattice configurations // J Opt. Soc. Am. A. – 2002. - V. 19. - № 10. - P. 2005-2017.