

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

МЯГКОВ ДМИТРИЙ ВАДИМОВИЧ

**ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ,
СФОРМИРОВАННЫЕ НА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С
ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент Портной Е.Л.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Сейсян Р.П.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Карпов С.Ю.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет

Защита состоится "22 октября 2007 г. в 15.00 часов на заседании диссер-
тационного совета K002.205.02 при Физико-техническом институте
им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан "21" сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Куликов Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации Развитие оптоэлектроники предполагает создание систем с высокой степенью интеграции, одним из важнейших инструментов которой является дифракционная решетка. Для широкого применения дифракционных решеток в приборах, рассчитанных на оптический диапазон электромагнитного излучения, необходима экономически эффективная технология формирования периодических структур на поверхности полупроводниковых приборов. В настоящее время развиваются две технологии, потенциально пригодные для создания подобных структур: наноимпринтинг и интерференционная фотолитография с использованием фазовой маски. В обеих технологиях в качестве шаблона применяются периодические структуры с высокой частотой повторения элементов. Шаблоны изготавливаются методом электронной литографии, что значительно повышает стоимость периодических структур. В данной работе рассматривается возможность изготовления периодических структур с субмикронным периодом методом интерференционной фотолитографии с применением неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стекла, что позволит заметно удешевить создание периодических структур в обеих технологиях.

Для того, чтобы подобрать параметры экспозиции для изготовления периодической структуры с наименьшим размером элемента, необходимо исследовать влияние следующих параметров на форму профиля периодической структуры: дозы экспозиции, контраста интенсивностей экспонирующих пучков, зависимости скорости растворения фоточувствительного материала от дозы экспозиции и эффекта стоячей волны. Наименее затратным методом достижения этой цели является компьютерное моделирование. Представляется возможным использовать непосредственное измерение зависимости скорости растворения от дозы экспонирующего излучения. Такой подход дает возможность построить довольно точную модель проявления фоторезиста, единственным приближением которой является пространственная дискретизация моделируемого профиля. Данная модель позволит с необходимой точностью определить не только влияние параметров экспозиции на форму профиля, но и критические моменты проявления фоторезиста: вскрытие подложки, перетравливание маски вследствие влияния стоячей волны, достижение маской

необходимой толщины и ширины штриха.

Возможность создания периодических структур с периодом, меньшим длины волны электромагнитного излучения видимого диапазона, делает возможным применение еще одного интересного свойства периодических структур с высокой пространственной частотой – способность таких покрытий уменьшать отражение от поверхности, на которой они сформированы.

Применение периодических структур в качестве просветляющих покрытий полупроводниковых приборов, позволяет заметно улучшить ввод и вывод излучения [1]. Однако неосвещенным остается вопрос о возможном сочетании интерференционного эффекта, обуславливающего уменьшение отражения света от периодической структуры [2], и дифракционных эффектов. Поскольку коэффициенты преломления полупроводниковых материалов достаточно велики, возможна ситуация, при которой периодическая структура не создает дифракционных порядков в воздухе, но формирует дифракционные порядки в материале. Обзор литературы показал, что периодические структуры, одновременно позволяющие уменьшить отражение от поверхности и осуществить дифракционный ввод излучения в прибор, не исследованы. Вследствие чего остается не исследованным механизм уменьшения отражения света от поверхности таких структур. Носит ли он интерференционный характер, как в случае с периодическими структурами, которые уменьшают отражение от поверхности и не формируют дифракционных порядков? Возможно ли, чтобы уменьшение отражения было вызвано перенаправлением света в дифракционные порядки в материале? Периодические структуры, которые не только уменьшают отражение от поверхности, что позволяет пропустить максимум падающего излучения в активную область прибора, но и формирующие дифракционные порядки в материале, позволяют увеличить поглощения света в активной области за счет направления света под углом к поверхности прибора. Также необходимо выяснить распределение интенсивности прошедшего в прибор излучения между нулевым порядком дифракции и высшими порядками.

Для ответа на поставленные выше вопросы, необходимо рассчитать эффективность дифракции на периодических структурах с высокой пространственной частотой повторения элементов, когда период структуры сравним

с длиной волны в материале. Для расчета был выбран метод, основанный на решении уравнения Гельмгольца в ограниченной области с искусственными краевыми условиями [3, 4].

В настоящей диссертационной работе проведено компьютерное моделирование процесса проявления неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стекла. Исследована периодическая структура, уменьшающая отражение от поверхности и дающая дифракционные порядки в материал прибора, на поверхности которого она сформирована. Также исследована применимость теории эффективной среды для объяснения просветляющего эффекта периодических структур, формирующих дифракционный порядок в материале, из которого они изготовлены.

Целью диссертационной работы является: Исследование периодических структур, уменьшающих отражение от поверхности полупроводникового прибора и формирующих дифракционный порядок в материале, а также возможности экономически эффективного изготовления таких структур.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые рассмотрены периодической структуры, совмещающие как свойство уменьшения отражения от поверхности, так и дифракционный ввод света в материал.
2. Рассмотрена возможность применения теории эффективной среды для расчета профиля периодической структуры, уменьшающей отражение от поверхности и формирующей дифракционные порядки в материале.
3. Разработан метод компьютерного моделирования проявления неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стекла, основанный на прямых измерениях зависимости скорости проявления фоторезиста от дозы экспозиции.

Исследование влияния параметров экспонирования на форму штриха периодической структуры, а также рассмотрение дифракционных свойств периодических структур, уменьшающих отражение от поверхности позволяют сформулировать

Практическую значимость работы:

В диссертационной работе впервые рассмотрены дифракционные свойства периодических структур уменьшающих отражение от поверхности по-

лупроводниковых приборов и предложено использовать такие структуры для увеличения эффективности фотопреобразования в полупроводниковых приборах с гетеропереходом. С помощью компьютерного моделирования, использующего прямые измерения зависимости скорости проявления фоторезиста от дозы экспозиции, найдены параметры оптимальной засветки для изготовления периодических структур с минимальным размером элемента, методом интерференционной фотолитографии с применением неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стекла.

Отсюда следуют положения, выносимые на защиту:

- Возможно совместить дифракционный ввод света с интерференционным механизмом уменьшения отражения от поверхности.
- Теория эффективной среды применима для расчета эффективного показателя преломления периодических структур, уменьшающих отражение от поверхности и обладающих дифракционными порядками в материале.
- Использование прямых измерений зависимости скорости проявления фоторезиста от дозы экспозиции позволяет провести компьютерное моделирование процесса проявления фоторезиста, ограничением точности которой является только пространственная дискретизация моделируемого профиля.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах лаборатории оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, международных симпозиумах "Nanostructures: Physics and Technology" (С.-Петербург, 2003, Новосибирск, 2007), на международном симпозиуме ICONO/LAT (Минск, 2007).

Публикации. По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 7 печатных работ, в т.ч. 2 статьи в реферируемых журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 85 страниц текста, включая 21 рисунок. Список цитируемой литературы содержит 60 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе дан обзор публикаций результатов исследований в области формирования периодических структур на поверхности полупроводниковых материалов методом интерференционной фотолитографии, а также их применения в качестве покрытий, уменьшающих отражение от поверхности.

Параграф §1.1 посвящен исследованию публикаций по вопросу формирования периодических структур методом интерференционной фотолитографии и методам компьютерного моделирования проявления экспонированного фоторезиста.

В настоящей работе был использован неорганический фоторезист негативного типа на основе халькогенидного стекла As_2S_3 имеющий высокое разрешение и высокий контраст проявления, что необходимо для получения предельно малых элементов.

Большинство современных пакетов для моделирования фотолитографического процесса используют различные модификации модели Дилла [5] для описания фотоструктурных изменений, происходящих в результате экспонирования фоторезиста и определения зависимости скорости проявления от дозы экспозиции [6]. Однако в данной работе зависимость скорости растворения от дозы экспонирующего излучения была получена экспериментально. Такой подход оправдан, поскольку для халькогенидного стекла As_2S_3 нелинейность эффекта поглощения от дозы полученного излучения, при измерении зависимости скорости растворения от дозы незначительны [7].

В §1.1 также освещены достижения в области применения лазерного излучения для наноструктурирования различных материалов.

Параграф §1.2 посвящен обзору публикаций об эффекте уменьшения отражения света от периодически профилированной поверхности, а также о методах расчета дифракционной эффективности.

Эффект уменьшения отражения света от поверхности, покрытой периодически расположенными элементами, с высокой пространственной частотой, впервые был обнаружен биологами при исследовании роговицы мотыль-

ков [8]. Роговица мотылька покрыта конусовидными колоннами из органического материала, периодически расположенными в двух взаимоперпендикулярных направлениях, образующих прямоугольную сетку. Исследования показали, что такое покрытие заметно уменьшает отражение от роговицы мотыльков в видимом диапазоне, вне зависимости от поляризации падающего излучения. Данный эффект был назван эффектом глаза мотылька. Дальнейшие исследования показали, что создание на поверхности стекла элементов, периодически расположенных в двух направлениях (скрещенные решетки), позволяет уменьшить отражение неполяризованного света [9], также наблюдалось 87 кратное уменьшение отражения света, поляризованного перпендикулярно штрихам решетки, от поверхности плавленого кварца покрытого структурами периодическими лишь в одном направлении (обычные дифракционные решетки) [10].

Период структуры, уменьшающей отражение от поверхности, не должен превышать длины волны падающего излучения, при этом слой, содержащий периодическую структуру, можно рассматривать, как и любую структурированную поверхность, как слой материала с некоторым эффективным коэффициентом преломления, средним между коэффициентами преломления сред, на границе которых сформирована периодическая структура. Для расчета эффективного показателя преломления как обычных [11], так и скрещенных решеток [12], уменьшающих отражение от поверхности, применяется теория эффективной среды.

Отражение от скрещенной или обычной решетки с треугольной формой профиля штриха практически не зависит от длины волны по сравнению с той же зависимостью для просветляющего покрытия на основе диэлектрических пленок и решеток с прямоугольным профилем. Интенсивность отраженного света не превышает десятой части падающего на структуру света практически во всем диапазоне изменения длин волн. Следовательно, для решеток с треугольной формой профиля уменьшение отражения происходит за счет плавного изменения эффективного показателя преломления, а не по механизму просветляющего слоя с усредненным показателем преломления и высотой, равной четверти длины волны света в просветляющем слое, что также подтверждается численными расчетами эффективности дифракции [13].

В заключении, параграф §1.3, отмечено, что существуют два типа периодических структур (периодичных в одном или двух направлениях), уменьшающих отражение света от поверхности, на которую они нанесены: решетки с прямоугольным и треугольным профилем элемента. Механизм уменьшения отражения основан на согласовании импедансов двух сред. Решетки с прямоугольным профилем штриха могут рассматриваться как антиотражающий слой с коэффициентом преломления, определяемым исходя из теории эффективной среды и толщиной, равной четверти длины волны света в материале, что делает их спектрально селективными. Периодические структуры с треугольным профилем элемента рассматриваются как антиотражающий слой с плавно меняющимся показателем преломления, что позволяет им уменьшать отражение от поверхности в широком диапазоне. Уменьшение отражения света от скрещенных решеток не зависит от поляризации падающего излучения, в отличие от структур, периодичных лишь в одном направлении.

Вторая глава посвящена исследованию возможности изготовления периодических структур с минимальным размером элемента методом интерференционной фотолитографии при помощи компьютерного моделирования процесса проявления фоторезиста.

Особенностью данной работы явилось применение неорганического фоторезиста негативного типа на основе халькогенидного стекла As_2S_3 , имеющего высокое разрешение и высокий контраст проявления, что необходимо для получения предельно малых элементов. Фоточувствительные пленки халькогенидного стекла наносятся испарением в вакууме, что обеспечивает даже на непланарных подложках высокую однородность пленок малой толщины. Необходимые для моделирования параметры неорганического резиста, такие как оптическое поглощение, коэффициент преломления и зависимость скорости растворения в проявителе от дозы экспозиции, были определены экспериментально. Особенностью этой зависимости является наличие порога чувствительности, ниже которого скорость растворения слабо зависит от дозы.

Участие в интерференции лучей, отраженных от границы фоторезиста и подложки ведет к возникновению стоячей световой волны, таким образом, распределение интенсивности в слое фоторезиста становится периодическим

не только по оси, направленной вдоль границы фоторезиста и подложки, но и по оси, перпендикулярной ей. Стоячая световая волна оказывает значительное влияние на форму профиля маски, приводя к заметному ухудшению вертикальности края. При изготовлении предельно малых элементов их размер становится сравнимым с толщиной фоточувствительного слоя, при этом наличие световой волны делает картину распределения интенсивности в объеме фоторезиста довольно сложной. Процесс формирования профиля маски в ходе проявления экспонированного фоторезиста, влияние параметров экспозиции и характеристик фоторезиста на форму профиля, методы снижения влияния стоячей волны требуют детального изучения.

В параграфе §2.1 приведена оптическая схема, применявшаяся для интерференционного экспонирования фоторезиста. В параграфе §2.2 освещен процесс нанесения фоторезиста, экспонирования, проявления, измерения зависимости скорости проявления от дозы полученного фоторезистом излучения. В параграфе §2.3 обсуждается компьютерная модель процесса проявления фоторезиста.

Скорость проявления зависит от распределения интенсивности света в толщине фоторезиста, которое зависит от интенсивности падающего света, длины волны, поляризации падающего на образец излучения, а также от угла падения, коэффициента поглощения света фоторезистом, коэффициента отражения света от границы фоторезиста с подложкой [14].

Моделировалось поперечное сечение маски, которое разбивается на равносторонние малые ячейки, таким образом, профиль представлен в виде прямоугольной сетки из равносторонних ячеек. Считая ячейку достаточно малой, можно считать интенсивность в ее пределах постоянной и равной интенсивности в центре ячейки. Умножив значение интенсивности, рассчитанное по формуле, приведенной в работе [14], на время экспозиции, получим дозу экспонирующего излучения, и с помощью экспериментально полученной зависимости скорости растворения от дозы экспозиции определим скорость растворения данной ячейки, а с учетом состояния соседних ячеек – время растворения.

Проявление начинается с верхней поверхности образца, все граничащие с поверхностью ячейки заносятся в массив проявляемых ячеек. Массив сорти-

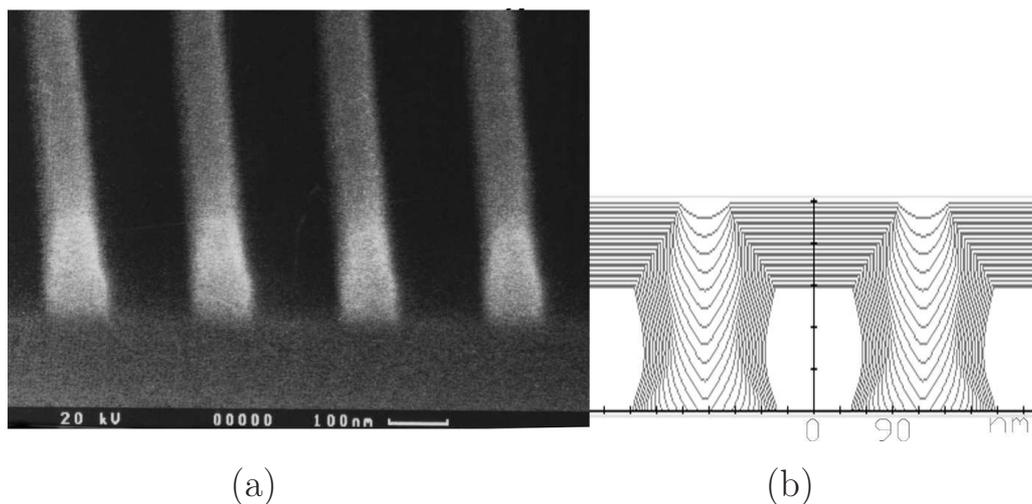


Рис. 1: Периодическая маска с периодом 250 нм и шириной штриха 80 нм. (а) – фотография с электронного микроскопа. (b) – профиль, полученный в результате моделирования

руется по возрастанию времени растворения ячейки, в результате чего первый элемент массива содержит информацию о ячейке с минимальным временем растворения. Ячейка, информация о времени растворения которой хранится в первом элементе массива проявляемых ячеек (или несколько первых элементов, если времена растворения отличаются не больше чем на величину машинного нуля), на следующем шаге программы считается растворенной, и время ее проявления вычитается из времени растворения остальных элементов массива проявляемых ячеек. Ячейки профиля, граничащие с ней, начинают растворяться и, следовательно, добавляются в массив, при этом время растворения уменьшается вдвое, если ячейка открыта для проявления двумя противоположными сторонами. Процесс прекращается по достижении заданного времени растворения или необходимого количества итераций. Результатом работы программы является набор профилей проявляемого резиста для ряда последовательных моментов времени.

Программа строит распределение интенсивности, а также скорости травления. Ограничением точности для данной модели является только размер ячейки массива, которым представлен профиль моделируемого резиста. Дискретизации по времени не проводится, так как характерным временем изменения профиля в процессе проявления служит время растворения ячейки. Поэтому можно определить форму профиля резиста в любой момент време-

ни.

В параграфе §2.4 проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Учитывая результаты компьютерного моделирования, был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния некоторых параметров экспозиции на форму профиля штриха. Время экспозиции оказывает заметное влияние на ширину штриха и форму его края. Увеличение времени экспозиции приводит к формированию маски с широким штрихом и ровным краем, что объясняется уменьшением контраста вследствие больших времен экспонирования. Недостаточное время экспонирования приводит к формированию масок с минимальной шириной штриха и ведет к катастрофической деградации маски вследствие перетравливания штриха у основания, что является проявлением эффекта стоячей волны, усиленного недостатком экспозиции.

Компьютерное моделирование показало, что влияние контраста интенсивности интерферирующих пучков можно заметно снизить подбором времени экспозиции и времени проявления. Наличие стоячей волны приводит к неоднородности ширины штриха в виде перетяжек. Влияние стоячей волны может быть уменьшено с помощью однородной дополнительной засветки. Однородная засветка наиболее эффективна для изготовления масок с минимальным размером штриха, при небольших значениях экспозиции, а также для однородного снижения контраста интерференционной картины, экспонирующей фоторезист. В заключении, параграф §2.5, отмечено, что найденные с помощью компьютерного моделирования параметры для оптимального экспонирования, а также особенности неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стеклообразного полупроводника позволили изготовить полосатую маску периодом 250 нм и шириной штриха 80 нм, с хорошей вертикальностью края. В качестве источника излучения использовался He-Cd лазер на парах металла с длиной волны $\lambda = 442$ нм. Фотография с электронного микроскопа и набор профилей, полученных компьютерным моделированием, представлены на Рис. 1. Сравнение данных моделирования с результатами экспериментальных исследований, подтвердило правильность сделанных допущений и позволяет считать модель адекватной экспериментальным данным.

В третьей главе. Исследованы два механизма взаимодействия света с фа-

зовой дифракционной решеткой: интерференционный механизм уменьшения отражения света от поверхности, на которой сформирована периодическая структура, и дифракционный ввод излучения в материал прибора. С помощью численного моделирования исследована зависимость дифракционной эффективности от высоты штриха решетки, уменьшающей отражение от оптической поверхности и одновременно формирующей дифракционный порядок в материале.

В параграфе §3.1 рассматривается механизм уменьшения отражения от периодической структуры с высокой пространственной частотой, приведена теория эффективной среды и общие механизмы согласования импедансов двух сред (в оптике импедансом является коэффициент преломления).

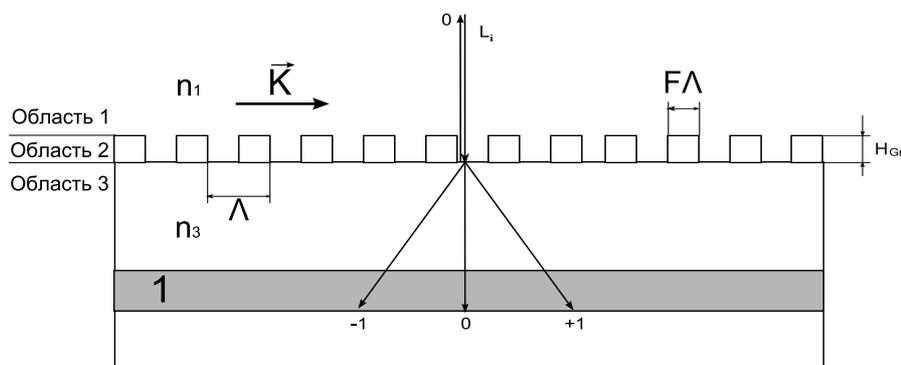


Рис. 2: Поперечное сечение дифракционной решетки, сформированной на входном окне оптоэлектронного прибора. L_i – падающий свет, 1 – активный слой прибора, H_{Gr} – толщина решетки, Λ – период, F – коэффициент заполнения, 0 – прошедший и отраженный свет, ± 1 – порядок дифракции.

Определяющим свойством периодических структур с высокой пространственной частотой является отсутствие дифракционных порядков, что имеет место, если период дифракционной решетки не превышает длины волны излучения в среде 1 и 3 (см. Рис. 2), то есть $\Lambda < (\lambda_0/n_{1,3})$. Это условие следует из формулы, связывающей углы падающего и дифрагированного света:

$$\sin \vartheta_n = \sin \vartheta + n \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

где ϑ_n – угол, под которым распространяется излучение в n – том порядке дифракции относительно нормали к поверхности решетки, ϑ – угол, под которым излучение падает на решетку, отсчитываемый относительно нормали к поверхности, λ – длина волны света в соответствующей среде. В отсутствии дифракционных порядков, когда длина волны падающего излучения заметно выше периода структуры, можно заменить периодическую структуру слоем материала с эффективным коэффициентом преломления n_2 : $n_1 < n_2 < n_3$ и толщиной, равной толщине периодической структуры.

Для вычисления эффективного показателя преломления, в параграфе §3.1.1 рассматривается нормальное падение плоской электромагнитной волны на регулярный набор тонких параллельных диэлектрических пластин. Рассмотрен случай нормального падения плоской электромагнитной волны, электрический вектор которой перпендикулярен или параллелен к пластинам. Расчеты приведены в предположении, что линейные размеры граней пластин велики, а их толщины малы по сравнению с длиной волны [15]. Эффективный коэффициент преломления, в случае если электрический вектор перпендикулярен пластинам:

$$n_{\perp} = \sqrt{\frac{n_1^2 n_2^2}{F n_2^2 + (1 - F) n_1^2}} \quad (2)$$

где F – коэффициент заполнения, равный доле общего объема занимаемого пластиной, n_1 – показатель преломления пластины, n_2 – показатель преломления среды.

Поскольку эффективная диэлектрическая проницаемость одинакова для всех направлений, параллельных пластинам, но различна для направлений, перпендикулярных к ним, такая система ведет себя как одноосный кристалл с оптической осью, нормальной к плоскости пластин.

В параграфе §3.1.2 Рассмотрены два способа согласования импедансов двух сред – создание "неотражающего" слоя и переходного слоя с плавно меняющимися свойствами.

Механизм создания антиотражающего покрытия основан на деструктивной интерференции падающей на поверхность просветляющего покрытия волны и волны отраженной от границы антиотражающего слоя и среды с боль-

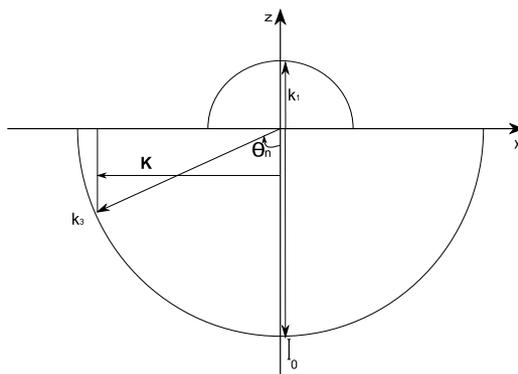


Рис. 3: Случай нормального падения плоской электромагнитной волны из воздуха на поверхность полупроводникового прибора, покрытого периодической структурой; период решетки подобран таким образом, чтобы дифрагированный порядок возникал только в материале прибора. Где $k_1 = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$ и $k_3 = n_3 \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновые вектора электромагнитной волны в воздухе и в материале прибора соответственно

шим показателем преломления.

Для создания антиотражающего слоя необходимо, чтобы импеданс Z_2 удовлетворял условию:

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (3)$$

где, Z_1, Z_2, Z_3 – импедансы областей один, два и три соответственно (Рис. 2). Ширина антиотражающего слоя L должна равняться четверти длины волны в просветляющем покрытии.

В параграфе §3.2 Рассмотрены дифракционные свойства периодических структур, уменьшающих отражение от поверхности.

Углы, под которыми распространяются дифракционные порядки, связаны с углом падения излучения на периодическую структуру и периодом дифракционной решетки известной формулой (1).

Для наглядной интерпретации данного соотношения используется сфера Эвальда. В случае нормального падения плоской электромагнитной волны из воздуха на поверхность полупроводникового прибора, покрытого периодической структурой, радиус сферы Эвальда для волн, распространяющихся в воздухе, меньше радиуса сферы Эвальда для волн, распространяющихся в материале прибора, более чем в три раза. Следовательно, возможно так подобрать период решетки, чтобы в воздухе не было дифрагированных порядков,

а в материале прибора был только один дифракционный порядок (Рис. 3).

Условие отсутствия дифракционных порядков в воздухе и наличия дифракционных порядков в материале решетки:

$$\frac{\lambda_0}{n_3} < \Lambda < \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (4)$$

где, λ_0 – длина волны света в воздухе, n_1 – показатель преломления среды, из которой свет падает на решетку n_3 – показатель преломления материала.

Из вышеприведенного условия следует, что только выбором периода дифракционной решетки можно добиться отсутствия дифракционных порядков в воздухе и наличия дифракционных порядков в материале решетки. С другой стороны, эффективный показатель преломления при выбранных показателях преломления для среды 1 и для среды 3 см. Рис. 2 зависит только от коэффициента заполнения (см. формулу 2). Исходя из условия (3) для импеданса неотражающего слоя, можно найти коэффициент заполнения, такой, что дифракционная решетка будет служить неотражающим слоем. Коэффициент заполнения в случае нормального падения света, если вектор напряженности электрического поля перпендикулярен штрихам решетки:

$$F_{\perp} = \frac{n_1}{n_1 + n_3} \quad (5)$$

где, n_1 – коэффициент преломления среды из которой падает излучение на периодическую структуру (среда 1, на Рис. 2), n_3 – коэффициент преломления среды под решеткой (среда 3, на Рис. 2).

Для расчета эффективности дифракции на периодической структуре, сформированной на поверхности полупроводникового материала, был выбран метод, использующий разложение Рэлея и основанный на решении уравнения Гельмгольца в ограниченной области с искусственными краевыми условиями [3, 4]. Данный метод был выбран в силу его применимости при любых форме штриха, соотношении коэффициентов преломления, длины волны и поляризации излучения. Метод не предполагает никаких приближений физического характера, неточность может возникнуть только на этапе численного решения уравнения Гельмгольца в вариационной постановке методом конечных элементов.

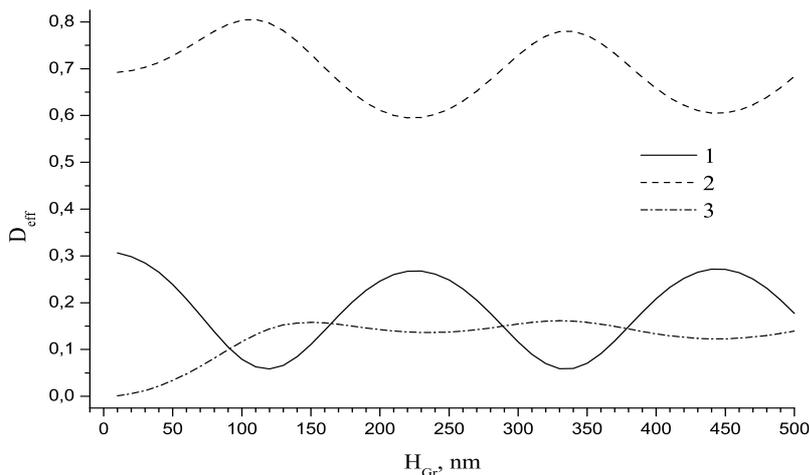


Рис. 4: Зависимость дифракционной эффективности D_{eff} различных порядков дифракции от высоты штриха H_{Gr} дифракционной решетки (длина волны – $1.06\mu m$, коэффициент преломления $n = 3.5$, поглощение не учитывается, падение нормальное, вектор электрического поля перпендикулярен штрихам решетки (ТЕ поляризация), период – 340 nm , ширина штриха – 75 nm) 1 – отраженный свет, 2 – нулевой порядок в прошедшем свете, 3 – первый порядок в прошедшем свете.

Для численного исследования зависимости эффективности дифракции от высоты штриха, необходимо выбрать модель прибора и длину волны излучения, на которую он рассчитан. В качестве такого прибора был выбран фотодетектор с усредненными параметрами, как наиболее простая для анализа модель. Периодическая структура сформированная на входном окне фотодетектора из материала самого прибора. Профиль зубцов решетки – прямоугольный. Длина волны – $1.06\mu m$, т.к. эта стандартная длина волны излучения полупроводниковых лазеров. Коэффициент преломления $n = 3.5$ был выбран как средний для полупроводниковых материалов. Падение нормальное. Вектор электрического поля перпендикулярен штрихам решетки, поляризация электромагнитной волны – поперечная. Период был выбран в соответствии с условием (4) и составляет – 340 nm , ширина штриха определяется условием (5) для коэффициента заполнения, отвечающего условию согласования импедансов между воздухом и материалом прибора. Таким образом, ширина штриха составила – 75 nm , поглощение не учитывается. Результат численного расчета зависимости дифракционной эффективности от высоты штриха приведена на Рис. 4.

Зависимость эффективности дифракции от высоты штриха имеет периодический характер; период и положения максимумов интенсивности отраженного и прошедшего в материал прибора 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 в материале. При этом основная часть прошедшего в материал света остается в нулевом порядке (Рис. 4).

Согласно численным расчетам эффективности дифракции только 15 процентов прошедшего в материал прибора света может быть направлено в первый порядок дифракции. Однако отражение от поверхности прибора, на которую нанесена периодическая структура, снизилось до 5% по сравнению с 40% отраженного света от ровной поверхности. Ввод части света под углом к активному слою дополнительно повышает эффективность поглощения света активной областью.

В заключении, параграф §3.3, отмечено, что формирование периодической структуре на входном окне фотопреобразующих полупроводниковых приборов позволяет увеличить коэффициент преобразования не только за счет уменьшения отражения от поверхности и улучшения ввода света в прибор, но и за счет увеличения длины поглощения части света, направленного в дифракционный порядок.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

1. S.I. Nesterov, D.V. Myagkov and E.L. Portnoi 'Nanoscale periodical structures fabricated by interference photolithography' //11th Int. Symp 'Nanostructures: Physics and Technology', (Saint-Petersburg, 2003).
2. S. I. Nesterov, D. V. Myagkov and E. L. Portnoi //Int. J.of Nanoscience // Vol. 3, N. 1 & 2 (2004)
3. Д.В. Мягков, В.Э. Грикуров, С.И. Нестеров, Е.Л. Портной. Два механизма взаимодействия света с фазовой дифракционной решеткой. // Письма в ЖТФ, т. 32, вып. 24 с. 62-67, 2006
4. D. V. Myagkov, M.O. Nestoklon and E.L. Portnoi, Computer simulation of inorganic photoresist based on chalcogenideglass As₂S₃ development. // Proc. 15th International symposium Nanostructures: Physics and Technology. pp.

86-87, (Novosibirsk, 2007).

5. D. V. Myagkov, V.E. Grikurov, S.I. Nesterov and E.L. Portnoi, Antireflective gratings with diffraction orders in transmitted light for optoelectronic applications. // Proc. 15th International symposium Nanostructures: Physics and Technology. pp. 145-146, (Novosibirsk, 2007).
6. D. V. Myagkov, V. E. Grikurov, S. I. Nesterov, and E. L. Portnoi, Periodical structures with antireflective and diffraction properties //Proc. SPIE Vol. 6732, 67321O (Jun. 28, 2007) .
7. D. V. Myagkov, M. O. Nestoklon, and E. L. Portnoi, Simple and effective algorithm of inorganic resist As₂S₃ development simulation // Proc. SPIE Vol. 6732, 67321V (Jun. 28, 2007)

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

- С помощью компьютерного моделирования процесса проявления неорганического фоторезиста на основе халькогенидного стекла исследовано влияние параметров экспозиции на форму профиля периодической структуры, что позволило изготовить структуру с минимальным размером элемента.
- Компьютерное моделирование позволило определить оптимальную дозу дополнительной однородной засветки для уменьшения влияния эффекта стоячей волны на форму вертикального края штриха.
- Предложено новое применение периодических структур, уменьшающих отражение от поверхности, – дифракционный ввод света в полупроводниковые приборы с гетеропереходом.
- Исследована дифракционная эффективность периодической структуры, сформированной на поверхности полупроводникового материала. Показана применимость теории эффективной среды для периодических структур уменьшающих отражение от поверхности и дающих дифракционный порядок в материал прибора.

Список литературы

1. Pfeiffer M., 'Nanotechnology in optics advances subwavelength-structured surfaces' // Europhotonics. – 2003. – № 5. – P. 33-34.
2. Brundrett D. L., Glytsis E. N. and Gaylord T. K. 'Homogeneous layer models

- for high-spatial frequency dielectric surface-relief gratings: conical diffraction and AR designs.' // Appl. Opt. – 1994. – V. 33. – P. 2695–2706.
3. V.E.Grikurov, E.Heikkola, P.Neittaanmaki, B.A.Plamenevskii. // Numerische Mathematik, 94 (2003), 269-288.
 4. V.E.Grikurov. Scattering, trapped modes and guided waves in waveguides and diffraction gratings, Proceedings of the First East-West Workshop on Advanced Techniques in Electromagnetics, 2004, Warsaw, May 20-21. [quant-ph/0406019].
 5. Dill F. H., Hornberger W. P., Hauge P. S., 'Characterization of positive photoresist' //IEEE Transaction on electron devices. – 1975. – V. 33, – N. 7. – P. 445–452.
 6. Ch. Zanke, A. Gombert, A. Erdmann, M. Weiss 'Fine-tuned profile simulation of holographically exposed photoresist gratings'//Opt. Comm. – 1998. – N. 154 – pp. 109-118.
 7. Kolobov A.V., Tanaka K., //Academic Press, 'Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices', – 2001. – V. 5. – P. 47.
 8. Bernhard C. G. 1967 Structural and functional adaptation in a visual system Endeavor V. 26 P. 79-84.
 9. Wilson S. J. and Hutley M. C., 'The optical properties of 'moth eye' AR surfaces.' // Optica Acta. – 1982 – V. 29, – P. 993-1009
 10. Enger R. C. and Case K., 'Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations' // Appl. Opt. – 1983. – V. 22. – № 20, – P. 3220-3228.
 11. Gaylord T.K.,Baird W.E., Moharam M. G., 'Zero reflectivity high spatial-frequency rectangular-groove dielectric surface-relief gratings.' // Appl. Opt. – 1986. – V. 25. – P. 4562-4567.
 12. Brauer R. Bryngdahl O., 'Design of antireflection gratings with approximate and rigorous methods' // Appl. Opt. – 1994 – v. 34. – № 33. – P. 7875-7882.
 13. Lalanney P., Morrisz G.M., 'Antireflection behavior of silicon subwavelength periodic structures for visible light'// Nanotechnology – 1997. – № 8. – P. 53-56.
 14. Johnson L.F., Kammlot G.W., Ingersoll , //Appl. Optics. –1978. – V. 17. – №. 8, – P. 1165.
 15. Born M., Wolf E., 'Principles of Optics' //Pergamon press – 1968.