

Наноструктуры и нанотехнологии в электронике

УДК 539.21, 621.3

О.Д. Вольпян¹, А.И. Кузьмичёв, канд. техн. наук²

Наноразмерные электронно-фотонные устройства на основе поверхностных плазмонных поляритонов

Рассмотрены основные направления реализации нанофотонных устройств на поверхностных плазмонных поляритонах и вопросы технологии плазмонной нанофотоники.

Principal directions of realization of nanophotonic devices based on surface plasmon polaritons and technological aspects of plasmon nanophotonics are considered.

Ключевые слова: нанофотоника, плазмоника, плазмон, поверхностный плазмонный поляритон, плазмонный волновод, литография

Введение

Известно, что прогресс в микроэлектронике связан с непрерывным повышением рабочих частот и уменьшением размеров микроэлементов; в итоге это привело к появлению субмикронной электроники (см. диаграмму на рис. 1). Следующая стадия в развитии электроники – исследование и освоение области наноэлектроники, где уже достигли определённого успеха в создании приборов с наноразмерными элементами (< 100 нм). Однако наивысшие рабочие частоты в электронике соответствуют гигагерцовому диапазону, что намного ниже терагерцовых частот в фотонике. С другой стороны, минимальный размер обычных фотонных элементов порядка рабочей длины волны λ , т.е. составляет единицы-десятки-сотни микрон, и даже миллиметры, что приводит к относительно низкому уровню интеграции и миниатюризации оптических схем. Из-за этого затруднено сопряжение электронных и фотонных компонентов в электронно-фотонных системах и замещение электронных элементов их более быстрыми фотонными аналогами. Отсюда неотложной задачей является продвижение фотоники в субволновой наноразмерный диапазон и преодоление дифракционных ограничений. Необходимо найти способы связи наноэлектронных элементов с нанофотонными. Последняя задача является жизненно важной для современной электроники, но, её можно решить, если использовать плазмонные эффекты, позволяющие связы-

вать свет с наноэлектронными элементами и реализовать плазмонную нанофотонику (рис. 1).

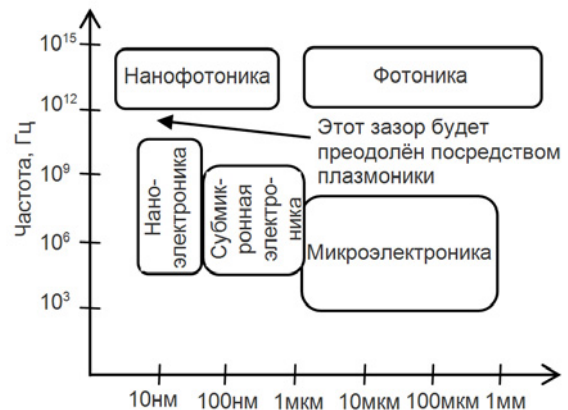


Рис. 1. Диаграмма “Минимальный размер элементов – диапазон рабочих частот” для электроники и фотоники

1. Поверхностные плазмоны

Поверхностный плазмон (surface plasmon – SP) – это квант электромагнитных плазменных колебаний электронов зоны проводимости металла вблизи его поверхности, вдоль которой он и распространяется [1]. Поскольку плазмоны связаны с поляризацией на поверхности, используется определение “поверхностные плазмонные поляритоны” – ППП (surface plasmon polaritons – SPPs) [1]. На рис. 2 представлена схема, показывающая ППП как колебания зарядов на интерфейсе между металлом и диэлектриком и демонстрирующая образование на интерфейсе волны поляризации. Электрическое поле волны имеет продольную (в z-направлении на рис. 2 а) составляющую, которая сдвинута по фазе на $\pi/2$ относительно поперечной составляющей (по нормали в x-направлении). Волна имеет поперечную магнитную компоненту (в u-направлении) и относится к волнам ТМ типа.

ППП является распространяющейся волновой модой, но без отражающих стенок – как, например, в световоде. Возможность существования ППП как волновой моды объясняется тем, что изменение фазы для нормальной со-

ставляющей электрического поля при двойном переходе из металла в диэлектрик и обратно кратно 2π . Это обусловлено тем, что диэлектрическая постоянная металла ε_m имеет отрицательное значение. Действительно, как показано на рис. 2б, нормальная составляющая электрического поля при переходе из одной среды в другую меняет знак (нормальная составляющая электрического смещения сохраняет непрерывность и знак не меняет). В результате интерфейс металл/диэлектрик может поддерживать волноводную моду, но только в области тех частот, где диэлектрическая проницаемость одной из сред отрицательна. Для металлов рабочая частота должна быть ниже частоты плазменных колебаний электронов, находящейся в большинстве случаев в области ультрафиолета, поэтому ППП вполне можно генерировать в диапазонах ИК и видимого света.

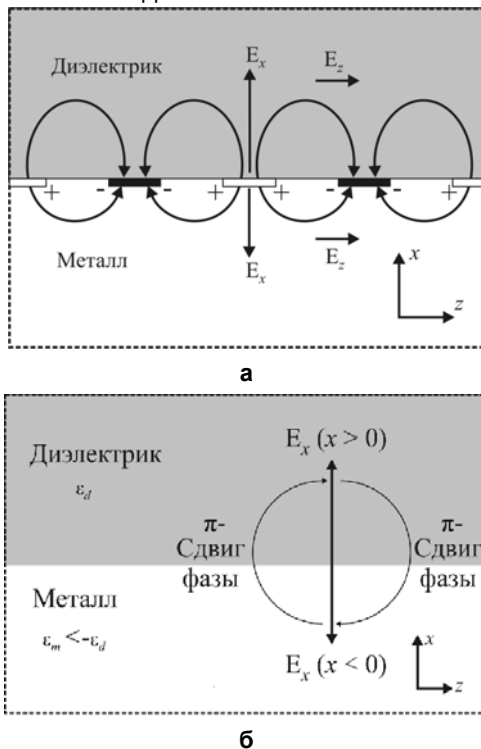


Рис. 2. ППП как колебания заряда на поверхности раздела между металлом и диэлектриком (а) и схема самосогласования фаз (б) [2]

Особенностью ППП является нераспространение волны вглубь металла и диэлектрика (она затухает по оси x), т.е. ППП сосредоточены в приповерхностной области. Чем больше поперечное ограничение волны, тем сильнее она поглощается в металле, и меньше длина распространения вдоль металла L_m , но тем не менее на поверхности Ag она может достигать 1 мм в ближнем ИК, чего вполне достаточно.

Другой особенностью является то, что эффективный показатель преломления для ППП превышает показатель преломления диэлек-

трика, поэтому длина волны ППП меньше λ в свободном пространстве, и мы получаем волну оптического диапазона частот, но с длиной, характерной для рентгеновских лучей! При этом на одной и той же частоте волновой вектор ППП больше волнового вектора фотона в свободном пространстве, поэтому возбуждение ППП фотонами при обычном способе облучения не возможно, но это возможно, если каким-либо образом увеличить составляющую импульса фотона, параллельную поверхности. Для этого было предложено много способов [1], из которых можно выделить: нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО) и связь через затухающую (evanescent) волну, поверхностные дифракционные решётки и нано локализованные источники света, туннелирование электронов через переход “металл-диэлектрик-металл” или “полупроводник-диэлектрик-металл”. Также предложены способы наблюдения ППП [1]: детектирование амплитуды и фазы отражённого света в системах с НПВО или излучения от различных неоднородностей на поверхности, сканирующая микроскопия ближнего поля.

Поверхностные электромагнитные волны, в том числе на поверхности металлов известны давно [1], но интерес к последним сильно возрос после понимания того, что в ППП генерируются сильные поля и с их помощью можно измерять малые изменения диэлектрической проницаемости, связанные с адсорбцией на поверхности единичных молекул. В фотонике ППП воспринимались как источник потерь в металлах, но развитие технологии позволило создавать плазмонные элементы и волноводы, способные транспортировать такое же количество информации как обычная фотоника и без дифракционных ограничений при субволновых сечениях волноводов [3,4]. Уникальные свойства ППП имеют важное значение для создания наноразмерной электронно-фотонной техники: дискретных приборов (фильтров, датчиков), устройств для управления распространением плазмонов (волноводов, зеркал, соединителей, переключателей), интегральных схем с пассивными и активными нано плазмонными компонентами. Для иллюстрации сказанного рассмотрим в качестве примера плазмонные волноводные устройства.

2. Плазмонные волноводные устройства

При создании интегральных плазмонных схем решаются две задачи – ограничение волны в поперечном направлении и увеличение L_m . Один из подходов – встраивание в диэлектрик тонких полосок металла (давно из-

вестно, что металлические плёнки толщиной порядка скин-слоя могут поддерживать так называемые дальнедействующие поверхностные плазмоны – long range SPs – LRSPs) [5,6]. Однако такие волноводы, хотя и обладают малыми потерями (~ 1 дБ/см), обеспечивают поперечную локализацию только порядка λ и, в результате, могут иметь место значительные потери на излучения в схемах, содержащих резкие изгибы. Другой подход использует канальные плазмонные поляритоны (channel plasmon polaritons – CPPs), которые локализуются в канавке, созданной на подложке с поверхностной металлизацией (см. рис. 3а) [4,7,8]. Такую канавку можно рассматривать как волновод между близко расположенными металлическими поверхностями; при этом из всех возможным мод при продольном распространении остаётся только так называемый щелевой (зазорный) поверхностный плазмон (gap SP – GSP), обладающий практически постоянным компонентом поля, нормальным к стенкам зазора. GSP локализуется на дне канавки в области порядка его длины волны $\lambda_{GSP} < \lambda$, может распространяться с малыми потерями и допускает радиус изгибов волновода порядка λ_{GSP} , что позволяет создавать очень миниатюрные волноводные схемы.

Обратной геометрией по отношению к канавке является клинообразный треугольный выступ (ребро, ребро) на поверхности, покрытой металлом (рис. 3 б), также способный поддерживать волновые моды типа ППП, которые можно назвать как “ППП на клине” (wedge plasmon polariton – WPP) [9]. CPP и WPP можно рассматривать как комплементарные моды, причём последний тип волны, как было показано теоретически и экспериментально на телекоммуникационных длинах волн $\lambda = 1,31$ и $1,55$ мкм, сильнее локализован в поперечном направлении, чем CPP, при близких L_m [3(с.211)].

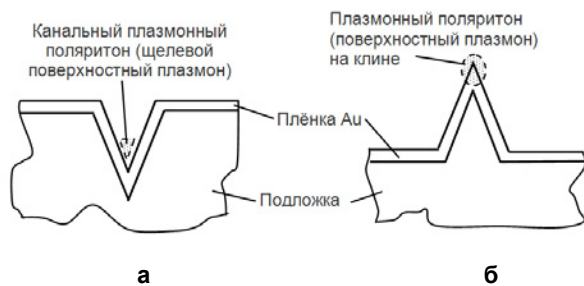


Рис. 3. Локализация плазмонных поляритонов на профилированной металлизированной поверхности

На рис. 4 представлены экспериментально апробированные на $\lambda = 1,55$ мкм конфигурации плазмонных LRSP-волноводов, выполненных из

золотых полосок толщиной 20 нм и шириной 8 мкм на слое из SiO₂ и покрытых либо SiO₂, либо полимером для согласования показателей преломления [4,6]. Важными элементами плазмонных схем являются отражатели. Как пример, на рис. 5а показано зеркало Брэгга, составленное из множества параллельных выступов (рёбер) из золота. Рис. 5б показывает, что коэффициент отражения SP-луча ($\lambda = 880$ нм) достигает почти 100 % при увеличении количества выступов до 20.

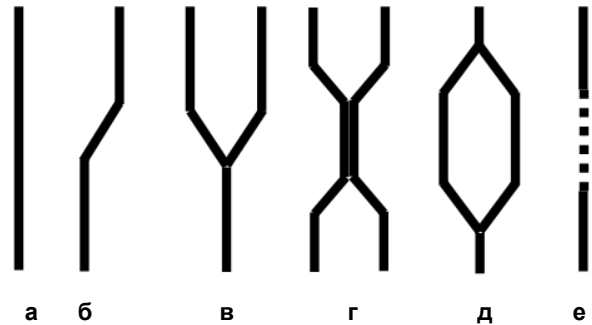


Рис. 4. Образцы плазмонных цепей: а – прямой волновод и б – с изгибом, в – Y-разветвитель, г – 4-х портовый разветвитель, д – интерферометр Маха-Цандера, е – волновод с решёткой Брэгга

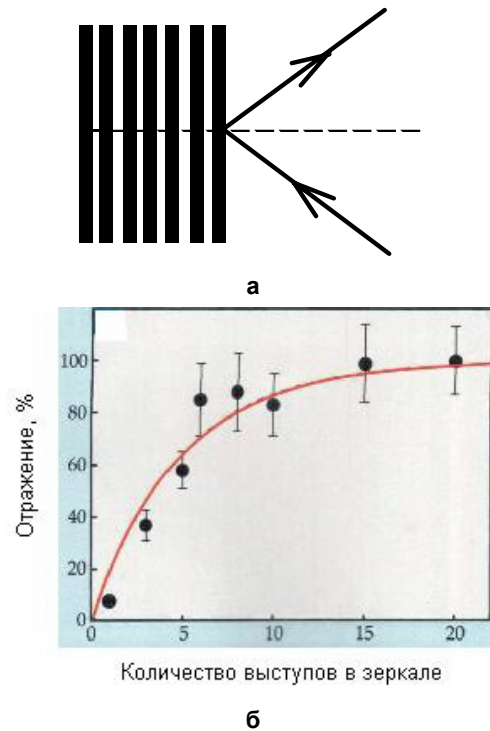


Рис. 5. Зеркало Брэгга из множества параллельных выступов высотой 75 нм и шириной 190 нм для отражения плазмонного луча [4]

Для создания плазмонных схем требуются не только пассивные, но и активные устройства, которые могут модулировать луч и выполнять логические функции. Очевидно, что для реализации активных устройств должны быть использованы нелинейные эффекты. Создано несколько типов подобных устройств: электрооп-

тические, термооптические и полностью оптические [4]. Термооптические модуляторы и переключатели на основе LRSP были первыми плазмонными компонентами, в которых та же самая металлическая цепь была использована как для передачи оптического излучения, так и подачи электрических сигналов, которые управляли волноводным процессом [10]. В этих устройствах тонкие волноводные полоски золота, внедрённые в полимер, нагревались постоянным или импульсным электрическим током. Нагрев изменял эффективный показатель преломления для плазмонных мод, которые распространялись по полоскам. Используя хорошо известные схемы, были построены интерферометрические модуляторы (устройства, которые модулируют интенсивность передачи, играя на интерференции между различными оптическими путями) и переключатели на базе направленного ответвителя. Эти устройства работают на телекоммуникационных длинах волн, потребляют малую мощность (около 10 мВт) и обеспечивают высокие отношения выходной мощности к входной при умеренном времени отклика.

Полностью управляемые оптические устройства ещё не реализованы в полном масштабе, но были испытаны отдельные устройства для проверки различных идей и принципов. Например, в качестве нелинейного элемента можно применить полоску металлического Ga, у которого при небольшом нагреве в 7 раз изменяется ε_m вследствие фазовых переходов, что может быть использовано для создания полностью оптических переключателей милливатной мощности [11].

Были продемонстрированы оптические бистабильные среды (аналоги триггеров), действие которых основано на том, что различные состояния молекул или наночастиц имеют отличающиеся спектры поглощения. Так, при поглощении излучения управляющего луча (оптического или плазмонного) одной частоты изменяются поглощение и преломление среды для другой частоты, что позволяет коммутировать или модулировать луч (опять оптический или плазмонный) на этой частоте.

Усиление плазмонных волн получено в структуре с *n-p* переходами и ППП, распространяющимся вдоль поверхности графена, покрытого диэлектриком [12].

3. Технологические аспекты производства плазмонных элементов и приборов нанофотоники

В настоящее время существует ряд методов синтеза плазмонных элементов, приборов и ин-

тегральных схем [3(с.209-221),9,13,14]. Из-за ограниченного объёма статьи здесь будут рассмотрены только отдельные, наиболее важные, аспекты технологии наноплазмоники, а именно: формирование рисунка (литография) и нанесение материалов на подложки. Обсуждаемые методы будем демонстрировать на примере технологии металлических волноводных элементов на поверхностных плазмонах, генерируемых на интерфейсе металл/диэлектрик. Вопросы технологии фотонных метаматериалов на плазмонных эффектах были рассмотрены в [13].

Для получения топологического рисунка плазмонных структур на плоских подложках применяют литографии высокого разрешения с использованием масок для локальной обработки, как это принято в технологии субмикронной электроники. Наиболее часто используют электронно-лучевую литографию в варианте “взрывная (lift-off) литография”. Однако поскольку хорошо сфокусированный электронный луч обрабатывает элементы рисунка последовательно, процесс характеризуется низкой производительностью и высокой стоимостью.

Безмасочными методами с высоким пространственным разрешением являются распыление сфокусированным ионным лучом и прямое химическое осаждение (формирование) наноструктур с использованием электронных, ионных и лазерных лучей для инициирования локальных химических реакций. Однако в этих методах элементы обрабатываются последовательно, поэтому они также не обеспечивают нужную производительность. Это относится и к зондовым методам.

Относительно большую производительность формирования рисунка способны обеспечить интерференционная и наноимпринтная литографии, при которых параллельно обрабатываются все элементы поверхности. Сущность интерференционной литографии понятна из названия. При наноимпринтной (или нанопечатной) литографии осуществляется механическая “наоштамповка” полимерных слоёв, например, резиста, для этого создаётся специальный штамп с нанорисунком из твёрдого материала (металла, кремния или диэлектрика). Данные методы литографии обеспечивают обработку многослойных структур, но надо учитывать накопление ошибок совмещения рисунков отдельных слоёв.

Рассмотрим несколько примеров формообразования плазмонных волноводов [3(с.209-221)]. Первый пример – формирование V-канавки для транспортировки канальных плазмонных поляритонов с использованием

наноимпринтной литографии (рис. 6). Вначале изготавливают штамп из монокристаллического кремния методами анизотропного жидкостного или реакционного ионного травления (РИТ) по фоторезистивной маске. Затем на плоскую подложку из кремния наносят слой 1-го полимера – полиметилметакрилата и деформируют его поверхность с помощью штампа. На профилированную поверхность наносят тонкий слой Au с последующим покрытием его 2-м полимером, который в дальнейшем будет подложкой для волновода. Этот полимер фотополимеризуют с помощью ультрафиолета. Затем 1-й полимер удаляют путём растворения, и получается реплика первичного штампа. В этом методе получается более гладкая волноводная поверхность, а, значит, и меньшие потери, чем в случае стандартного осаждения металла в заранее сделанную канавку.

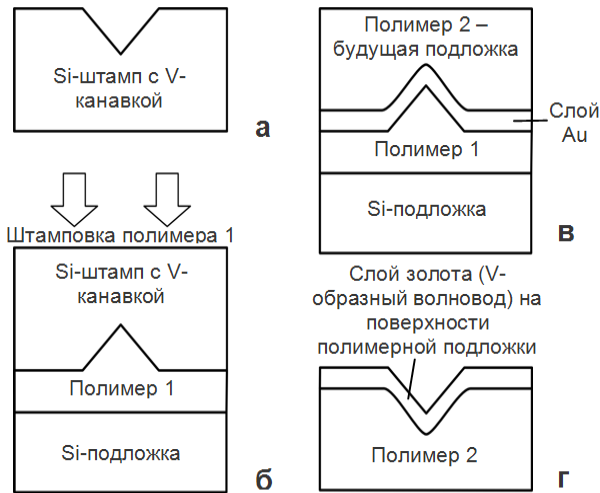


Рис. 6. Этапы технологического процесса изготовления волновода с V-образной канавкой: а – изготовление штампа, б – нанесение слоя полимера 1 на подложку и штамповка (выдавливание) V-образных выступов на полимере, в – нанесение слоёв Au на полимер 1 и полимера 2 на Au с последующей полимеризацией полимера 2, г – химическое удаление полимера 1 (вместе с кремниевой подложкой)

Анизотропное травление кремниевого штампа в КОН позволяет получить угол в канавке порядка 70° , это затрудняет изготовление изгибов волнопроводов. Для уменьшения угла до примерно 50° лучше применять РИТ, а ещё лучше сочетать РИТ с окислением кремния, как показано на рис. 7. Здесь после окисления кремния (например, термохимическим методом) даже в канавке с плоским дном формируется канавка с малым углом схождения. В результате получается широкополосный волновод с поперечным субволновым ограничением волны и длиной распространения ППП более 100 мкм.

Рассмотрим примеры технологий изготовления плазмонных волнопроводов в виде клинообразных выступов на плоской подложке с использованием ультрафиолетовой фотолитографии (рис. 8) [9]. Вначале создаётся временная подложка-носитель из topo-Si, в которой стандартным анизотропным жидкостным травлением изготавливается канавка, обратная по форме Λ -волноводу. На её поверхность осаждается электронно-лучевым испарением Au (0,5 мкм), а затем на Au наносится слой Ni толщиной около 50 нм. После удаления подложки-носителя слой Ni служит подложкой для клинообразной волноводной системы.

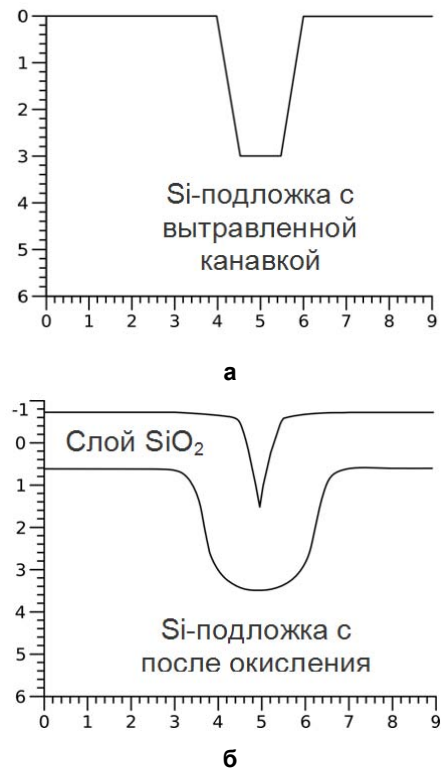


Рис. 7. Изготовление штампа с более острым углом V-канавки (размеры указаны в микронах)

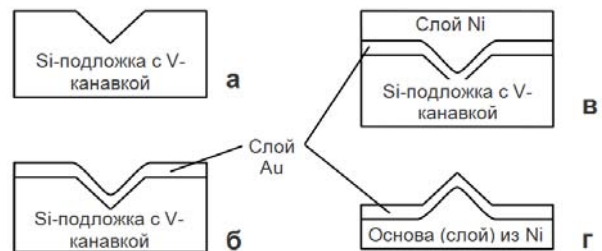


Рис. 8. Изготовление волновода с Λ -образным выступом: а – изготовление подложки-носителя, б – нанесение Au на подложку, в – нанесение Ni на слой Au золота для изготовления Ni-основы для волновода, г – удаление кремниевой подложки-носителя

Нанесение металла в глубину канавки подложки-носителя позволяет получить более острый кончик Λ -выступа (около 70°) и более глад-

кую поверхность, чем при стандартном подходе, когда металл наносится на предварительно изготовленный выступ на подложке. Описанная выше технология позволяет транспортировать ППП с малыми потерями и $L_m \sim 120$ мкм на телекоммуникационных волнах. Применяя технику окисления кремния можно уменьшить угол V-канавки в подложке-носителе и затем угол при вершине клинообразного Λ -волновода.

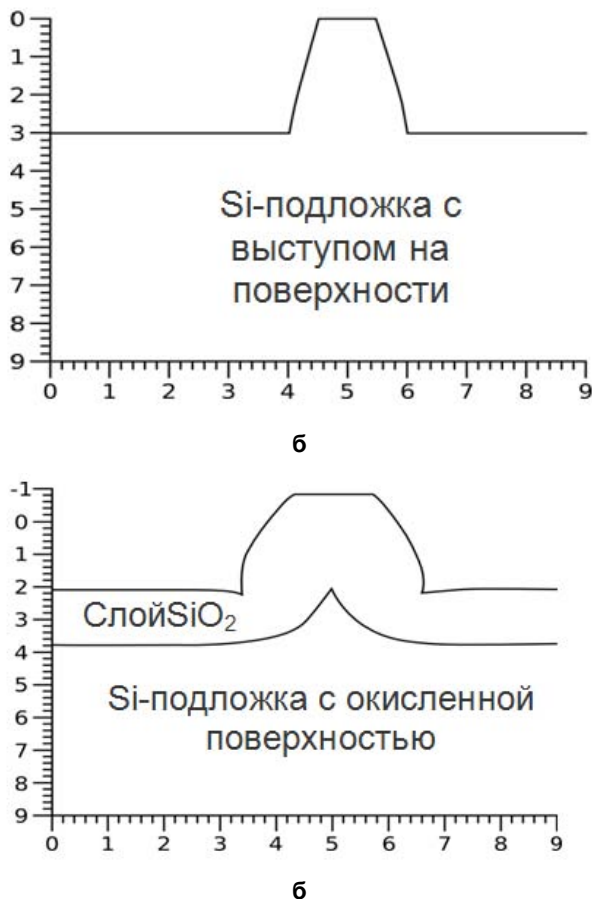


Рис. 9. Изготовление штампа с окислением кремния для получения более острого Λ -образного выступа (размеры указаны в микронах)

Технику окисления можно применить и при изготовлении штампа для nanoимпринтной литографии клинообразных волноводов (рис. 9). Так, заготовка штампа с выступом на поверхности, полученная путём травления кремния через отверстия в маске, как правило, имеет трапециoidalную форму выступа (рис. 9а). Для его заострения с целью улучшения характеристик плазмонного волновода можно применить термохимическое окисление кремния (рис. 9б) с последующим удалением слоя окисла с помощью высокоселективного травителя.

Большое значение имеют правильный выбор материала и технологии металлических и диэлектрических слоёв для получения низких потерь: необходимо минимальное рассеивание волн в слоях толщиной в десятки нанометров.

Они должны иметь сплошную и плотную малодефектную структуру при нанометровой шероховатости и высокую стойкость к воздействию окружающей среды. Из металлов используют Ag и Au, реже Cu или Al, из неорганических диэлектриков – SiO₂, MgF₂, или Al₂O₃. Для осаждения материалов часто используют электронно-лучевое испарение, но сейчас внедряется метод импульсного магнетронного распыления [14], который обеспечивает повышенную энергетическую активацию процесса конденсации. Методы химического осаждения из растворов и CVD также имеют определённый потенциал.

Выводы

Рассмотрены основные направления реализации наноразмерных электронно-фотонных устройств на поверхностных плазмонных поляритонах путём применения тонкоплёночных металл-диэлектрических наноструктур с иллюстрацией на примере плазмонных волноводов. Имеется значительный прогресс в технологии, в основном благодаря развитию уже хорошо освоенных методов современной микроэлектроники и последним достижениям нанотехнологии, в частности, nanoимпринтной литографии.

Литература

1. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела. Сб. статей / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллс. – М.: Наука, 1985. – 525 с.
2. Gordon R. Surface plasmon nanophotonics: a tutorial // IEEE Nanotechn. Mag. – 2008. – Vol. 2. – No. 3. – P. 12-18.
3. Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications. / Ed. S. Zouhdi *et al.* Springer, 2009. – 305 p.
4. Ebbesen T.W. *et al.* Surface-plasmon circuitry // Physics Today. – 2008. – Vol. 61. – No. 5. – P. 44-50.
5. Boltasseva A. *et al.* Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons // J. Lightwave Technol. 2005. – Vol. 23. – No. 1. – P. 413-422.
6. Charbonneau R. *Et al.* Demonstration of integrated optics elements based long-ranging surface plasmon polaritons // Opt. Exp. – 2005. – Vol. 13. – No. 3. – P. 977-984.
7. Volkov V.S. *et al.* Wavelength selective nanophotonic components utilizing channel plasmon polaritons // Nano Lett. – 2007. – Vol. 7. – No. 4. – P. 880-884.
8. Moreno E. *et al.* Channel plasmon-polaritons: modal shape, dispersion, and losses // Opt. Lett. – 2006. – Vol. 31. – No. 23. – P. 3447-3449.

9. *Boltasseva A. et al.* Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths // *Opt. Exp.* – 2008. – Vol. 16. – No. 8. – P. 5252-5260.
10. *Nikolajsen T. et al.* Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 85. – No. 24. – P. 5833-5835.
11. *Bennet P.J. et al.* A photonic switch based on a gigantic, reversible optical nonlinearity of liquefying gallium // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 85. – No. 24. – P. 5833-5835.
12. *Rana F.* Graphen terahertz plasmon oscillators // *IEEE Trans. Nanotechnol.* – 2008. – Vol. 7. – No. 1. – P. 91-99.
13. *Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И.* Вопросы технологии наноструктурных фотонных метаматериалов // *Электроника и связь.* – 2009. № 2-3. Ч. 1. – С. 50–55.
14. *Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И.* Магнетронное нанесение оптических покрытий при питании магнетронов переменным напряжением средней частоты // *Прикладная физика.* – 2008. – № 3. – С. 34–52.

¹ ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»,
Москва, Российская Федерация

² Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»