

УДК 535.365

## **Анализ методов применения наноразмерных структур для создания оптических межсоединений на кристалле**

*Ковальчук А.Ю, к.т.н., доц. Мачулянский А.В.*

Современные микропроцессоры работают на частоте, не превышающей нескольких гигагерц из-за проблем с теплоотводом из интегральных схем при высоком тепловыделении. По этой причине в начале двадцать первого века начался переход на многоядерные технологии, которые позволяют увеличивать производительность микропроцессоров без увеличения их тактовой частоты. В большей мере производительность микропроцессоров определяется эффективностью коммуникаций между ядрами. Это означает, что важную роль играют межсоединения на кристалле, которые должны обладать высокой пропускной способностью, высокой степенью интеграции и низким энергопотреблением. Однако электрические межсоединения используются на пределе своей пропускной способности и не удовлетворяют требованиям современных многоядерных архитектур [1].

Поэтому необходим переход на новые технологии связи на кристалле, удовлетворяющие ряду требований, основными из которых являются

масштабируемость, воспроизводимость и планарность.

Наиболее перспективным решением обозначенной проблемы является внедрение оптических межсоединений на верхних уровнях интегральных схем, поскольку оптические волноводы обладают шириной полосы пропускания более 1 Тбит/с при субмикрометровом размере поперечного сечения. Несмотря на большой прогресс в области диэлектрических волноводов фотоника обладает фундаментальным ограничением на размеры, которые диктуются дифракционным пределом. Использование фотонных компонент накладывает физическое ограничение на степень интеграции.

Следовательно требуется поиск новых способов коммуникаций на кристалле, и наиболее перспективным решением этой проблемы является переход от объёмных оптических волн к поверхностным плазмон-поляритонам (ППП). Они являются поверхностными волнами, распространяющимися вдоль границы раздела металл-диэлектрик и характеризуются более короткими длинами волн и высокой локализацией электромагнитного поля [2,3].

Плазмонные волноводы позволяют повысить локализацию электромагнитного поля и уменьшить расстояние между двумя волноводами до величины порядка 100нм, что позволяет более чем на порядок повысить степень интеграции по сравнению с фотонными волноводами. Однако использование металлов ведет к омическим потерям, и чем выше локализация, тем большая доля электромагнитного поля ППП находится в металле, и тем выше потери. Эта проблема актуальна не только для межсоединений. Она является фундаментальной для всей плазмоники и препятствует созданию устройств на основе поверхностных плазмонов и ППП.

Решением могло бы стать использование материалов альтернативных золоту и серебру, которые давали бы меньшие потери.

Целью работы является анализ способов реализации плазменных волноводов в виде наноразмерных компонент на кристалле для оптических межсоединений в устройствах обработки информации.

В ряде работ по распространению плазмонов предлагается структура, состоящая из цепочки серебряных или золотых наночастиц, размером не более 100нм [4,5]. Преимуществом наночастиц является то, что на определенных частотах поле достаточно хорошо локализовано. К основным недостаткам данной структуры можно отнести: высокую дисперсию и дисперсию групповых скоростей из-за ее периодичности,

нежелательные отражения при связи такого рода волновода с другими фотонными и плазмонными волноводами, длина пробега ППП меньше длины волны света или сравнима с ней.

Одним из самых распространенных типов плазмонных волноводов являются волноводы типа диэлектрик-металл-диэлектрик (ДМД). Данная структура имеет две моды: симметричную и антисимметричную (Рис.1) [6-8]. Симметричная мода характеризуется значительно большим волновым числом, чем антисимметричная мода при фиксированной частоте, соответственно глубина проникновения электромагнитного поля в окружающие пленку диэлектрики меньше, следовательно поле гораздо лучше локализовано.

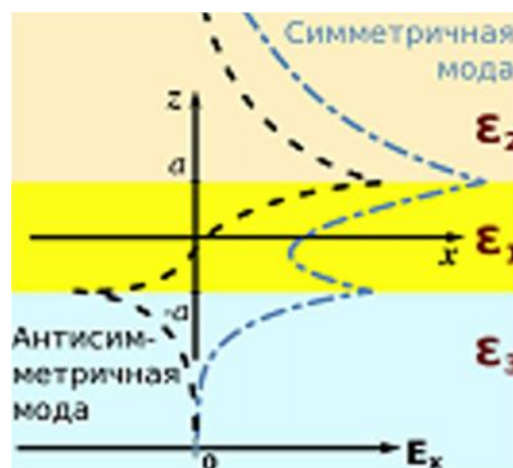


Рис. 1. Схема ДМД волноводной структуры, где  $a$  – полутолщина металлической пленки,  $\epsilon_1$  – ее диэлектрическая проницаемость, а  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  – диэлектрические проницаемости непроводящих сред, окружающих пленку. Штриховой и

штрихпунктирной линией изображено пространственное распределение поля  $E$  для симметричной и антисимметричной мод. [6-8]

Но это приводит к большим омическим потерям и, следовательно, длина пробега довольно маленькая. Однако длину пробега антисимметричной моды можно увеличить за счёт уменьшения толщины металлической плёнки. Но размеры не позволяют применять эту моду внутри чипа [9].

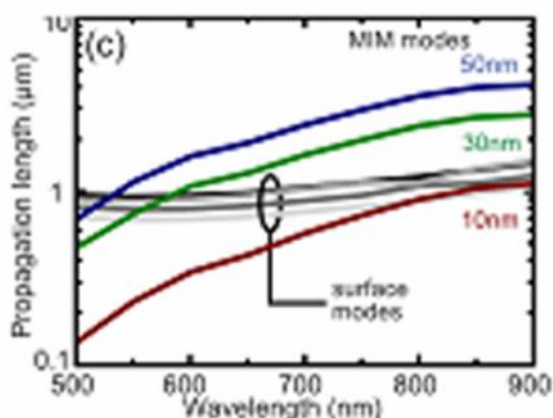


Рис. 2. Зависимости длины пробега от длины волны света для структуры  $Ag/SiO_2/Ag$  при различных значениях зазора между серебряными слоями [12]

Волноводы металл-диэлектрик-металл (МДМ). На оптических частотах имеют глубину проникновения электромагнитного поля в металл всего 20-25 нм, а значит, размер моды по одному измерению можно понизить практически до размера самого волновода. Также МДМ волноводы имеют металлические обкладки, что позволяет использовать их в качестве

электрода, а значит эта структура имеет хорошие электрооптические свойства [10, 11]. Однако существует проблема связанная с омическими потерями в металле (рис.2).

Длина пробега ППП довольно мала и остается проблема локализации поля в поперечном сечении, в то время как при уменьшении ширины волновода возникает ситуация аналогичная проблеме локализации поля в плоском конденсаторе: влияние краевых эффектов будет настолько велико, что локализация поля в поперечном направлении будет немногим меньше, чем в фотонных волноводах, тогда как длина пробега ППП будет на 3-4 порядка меньше.

Нагруженные диэлектриком плазмонные волноводы. Данные структуры представляют собой диэлектрическое ядро прямоугольной формы в сечении, расположенное на металлической пленке (Рис.3) и являются попыткой уменьшения размера моды ППП, распространяющихся по металлической пленке. Особенностью нагруженных диэлектриком плазмонных волноводов является существование направляемой ТМ моды даже при бесконечно малых размерах диэлектрического ядра [13]. Для того, чтобы минимизировать размер моды, требуется увеличить показатель преломления ядра, например использовать соответствующие материалы, а так же оптимизировать геометрические параметры ядра – ширину  $w$  и высоту  $h$ . Учитывая одинаковую важность размера моды и длины пробега можно

достичь маленького размера моды (для плазмонных волноводов), однако абсолютное значение длины пробега ППП хотя и больше, чем у других типов волноводов при том же размере моды, но не превышает 10 мкм, чего не достаточно для создания межсоединений на кристалле [14].

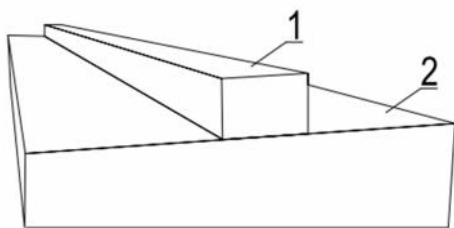


Рис. 3. Схематическое изображение нагруженного диэлектриком плазмонного волновода: 1 – диэлектрик, 2 – металл

Канальные плазмонные волноводы. Основа работы лежит в использовании профиля металлической поверхности для ограничения поперечного размера моды. Было показано, что вдоль каналов треугольного сечения, вырезанных в металлической пленке могут распространяться ППП [15]. Несмотря на высокие значения параметров поперечного размера моды, который может составлять 600 нм на телекоммуникационных длинах волн, данный тип волноводов не может быть применен в реальных оптических интегральных схемах, так как процесс изготовления каналов очень сложен, дорог и не рассчитан на массовое производство. А длина пробега не превышает нескольких десятков микрометров, что

недостаточно для создания межсоединений на кристалле и компонентов для них (Рис. 4).

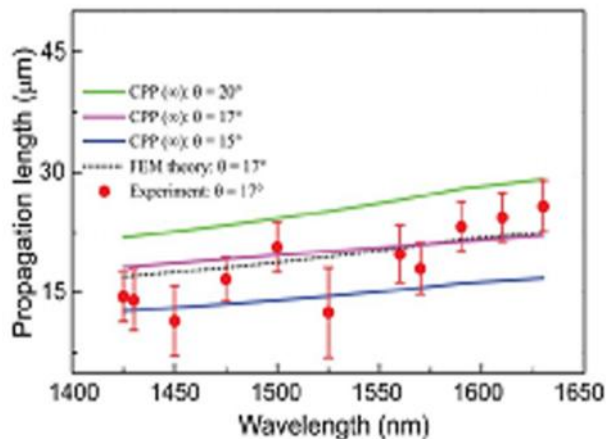


Рис. 4. Зависимость длины пробега ППП, распространяющегося вдоль канала, вырезанного в золотой пленке от длины волны в вакууме, на которой возбуждается ППП для разных углов в основании канала при одинаковой глубине канала (~1.7 мкм)

Гибридный оптический волновод состоит из диэлектрической нанопроволки с высоким показателем преломления, отделенной от металлической поверхности наноразмерным диэлектрическим зазором с малым показателем преломления. Особностью данной структуры является диэлектрический зазор: электромагнитное поле выталкивается из

сред с высоким показателем преломления (полупроводника и металла) и концентрируется в зазоре, что позволяет достичь меньших потерь по сравнению с нагруженным диэлектриком волноводом, где зазор между металлом и полупроводником

отсутствует. Длина пробега составляет 30-100 мкм, в то время как электромагнитное поле хорошо локализовано в зазоре. В действительности такой гибридный волновод приблизительно в два раза лучше, чем нагруженный диэлектриком плазмонный волновод. Главным недостатком данной структуры является отсутствие возможности использования металла в качестве электрода, так как он отделен слоем изолятора от полупроводника. Этот недостаток многократно снижает преимущества структуры, и ее применение в оптоэлектронике становится практически невозможным.

### Выводы

Исходя из анализа основных типов плазмонных волноводов установлено, что существующие варианты уменьшения размера моды либо не дают возможность достичь субволновых поперечных размеров, либо длина пробега ППП не превышает 10-20 мкм, что не позволяет получить сверхкомпактные компоненты для оптических межсоединений на кристалле. Причиной этому является тот факт, что, уменьшая размер моды, уменьшается доля ППП, локализованная в диэлектрике, а, следовательно, доля ППП в металле возрастает, что ведет к увеличению омических потерь.

Самым приоритетным решением задач в этой области является создание новых способов компенсации потерь в ППП и интеграции активных

плазмонных волноводов на одном кристалле.

### Литература

1. D.A.B. Miller, H.M. Ozaktas, Limit to the Bit-Rate Capacity of Electrical Interconnects from the Aspect Ratio of the System Architecture // *Journal Parallel and Distributed Computing* 41, 5252 (1997).
2. S.I.Bozhevolnyi, ed., *Plasmonic Nanoguides and Circuits* (Pan Stanford Publ., 2008).
3. R.Zia, J.A. Schuller, A. Chndran, M.L. Brongersma, Plasmonics: the next chip-scale technology // *Materials Today* 9(7-8), 20-27 (2006).
4. M.L. Brongersma, J.W. Hartman, H.A. Atwater, Electromagnetic energy transfer and switching in metal nanoparticle chain arrays below the diffraction limit // *Physical Review B* 62, R16 356 (2000).
5. S.A. Maier, M.L. Brongersma, P.G. Kik, H.A. Atwater, Observation of near-field coupling in metal nanoparticle chains using far-field fdg polarization spectroscopy // *Physical Review B* 65, 193408 (2002).
6. D. Yu. Fedyanin, A.V. Arsenin, V.G.Leiman, A.D. Gladun, Surface plasmon-polaritons with negative and zero group velocities propagating in thin films

- //Quantum Electronics 39, 745-750 (2009).
7. E.N. Economou, Surface plasmon in thin film // Physical Review 182. 539 (1969).
  8. J.J. Burke, G.I. Stegeman, T. Tamir, Surface-polariton-like wave guided by thin lossy metal film // Physical Review B 33, 5186 (1868).
  9. M.N. Zervas, Surface plasmon-polariton waves guided by thin metal film // Optics Letters 16, 720 (1991).
  10. P. Neutens, P. Van Dorpe, I. De Vlaminck, L. Lagae, G. Borghs, Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides // Nature Photonics 3, 283-286 (2009).
  11. J.A. Dionne, K. Diest, L.A. Sweatlock, H.A. Atwater, PlasMOStor: A Metal-Oxide-Si Field Effect Plasmonic Modulator // Nano Letters 9, 897-902 (2009).
  12. M. Kuttge, W. Cai, F.J. Garcia de Abajo, A. Polman, Dispersion of metal-insulator-metal plasmon polaritons probed by cathodoluminescence imaging spectroscopy // Physical Review B 80, 033409 (2009).
  13. A.V. Krasavin, A.V. Zayats Silicon-based plasmonic waveguides // Optics Express 18, 11791-11799 (2010).
  14. V.A. Zenin, V.S. Volkov, Z. Han, S.I. Bozhevolnyi, E. Devaux, T.W. Ebbesen, Dispersion of strongly confined channel plasmon polariton modes // Journal of Optical Society of America B 28, 1596-1602 (2011).
  15. J.Q. LU, A.A. Maradudin, Channel plasmons // Physical Review B 42, 11159-11165 (1990).