



УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СУБВОЛНОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

ЧАСТЬ 2*

А. Андриевский, ООО "Лазерском", Беларусь;
Датский Технический Университет, Дания

В первой части статьи мы рассмотрели разнообразные линзы как устройства ввода-вывода (УВВ) оптического излучения в субволновые волноводы. Вторая часть посвящена устройствам ввода-вывода на основе связанных волноводов и дискретных рассеивателей.

УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДОВ

Эффективные технологии ввода излучения в некоторые типы широких несубволновых волноводов, например в оптическое волокно или в кремниевые интегральные волноводы, разработаны достаточно хорошо. Соответственно, можно предварительно вводить оптическое излучение в широкий волновод, а далее передавать его в субволновой волновод. Возможны различные физические механизмы реализации данной идеи (рис.1), а именно:

- 1) прямая стыковка,
- 2) резонансная волноводная секция,
- 3) плавно сужающаяся волноводная секция,
- 4) направленный ответвитель.

1. Ввод излучения при прямой стыковке волноводов

В случае прямой стыковки (рис.1а) волноводы приводятся в непосредственный физический контакт друг с другом. Этот вид стыковки волноводов широко используется для волоконно-оптического оборудования при стыковке оптических волокон при помощи коннекторов и адаптеров. Однако при вводе излучения в субволновые волноводы излучение не только проходит из первого волновода во второй, но также отражается назад и рассеивается в стороны из-за различных импедансов волноводов и различного распределения электромагнит-

IN- AND OUT-COUPLING DEVICES FOR SUBWAVELENGTH WAVEGUIDES

PART 2

A. Andryieuski, LasersCom, LLC, Belarus;
Technical University of Denmark, Denmark

In the first part of the article we considered various lenses as in – and out-coupling devices (IODs) for optical radiation to subwavelength waveguides. The second part is devoted to the in – and out-coupling devices on the basis of coupled waveguides and discrete scatterers.

IN- AND OUT-COUPLING DEVICES ON THE BASIS OF COUPLED WAVEGUIDES

Efficient technologies for coupling light into certain types of wide non-subwavelength waveguides (for example, optical fiber or silicon waveguide) are developed quite well. It is therefore possible to launch optical radiation first into a wide waveguide and then to a subwavelength waveguide. This can be realized in various ways (Fig.1), namely as:

1. End-fire coupling,
2. Resonant waveguide section,
3. Gradually tapered section,
4. Directional coupler.

1. End-fire coupling

In case of the end-fire connection (Fig. 1a) the waveguides are brought into a physical contact. This type of the waveguides connection is widely used in optical communication equipment for connecting optical fibers with connectors and adaptors. However, upon propagation the radiation is not only transmitted from the first into the second waveguide, but is also reflected and scattered due to different waveguides impedances and mode field spatial profiles (Fig. 2). The closer the electromagnetic modes field profiles resemble each other, the larger is the coupling efficiency (CE). Theoretically calculated CE for coupling a silicon waveguide into a plasmonic waveguide of a similar size is around 50% [1], but for a certain combinations of the waveguides CE can reach 90% [2]. In practice, however, experimentally measured values are sufficiently smaller. For example, in the work [3] CE=30% at the wavelength 1.55 μm was demonstrated.

* Часть 1 см.: Фотоника, 2016, №1, с. 98-110.

ного поля мод, распространяющихся в них (рис.2). Чем более похожи распределения электромагнитных мод стыкуемых волноводов, тем выше коэффициент ввода (КВ) излучения. Теоретические рассчитанные значения коэффициента ввода излучения из кремниевого волновода в плазмонный волновод сходного размера обычно имеют величину порядка 50% [1], однако для определенных сочетаний волноводов эта величина может достигать даже 90% [2]. На практике же экспериментально измеренные значения существенно меньше, например, в работе [3] был продемонстрирован коэффициент ввода около 30% для длины волны $\lambda=1,55$ мкм.

2. Использование резонансной волноводной секции

Идея использования резонансной вставки (рис.1b) сходна с идеями использования просветляющих покрытий с показателем преломления n и толщиной $\lambda/4n$ (λ – длина волны в вакууме) в оптическом диапазоне и четвертьволновых трансформаторов в СВЧ-диапазоне. Физически, высокое пропускание достигается благодаря согласованию импедансов волноводов при помощи резонатора. Недостатком использования резонатора являются сужение рабочего диапазона длин волн и возрастание потерь в случае использования материала с потерями в резонаторе. Резонансная вставка может быть использована как для согласования плазмонных волноводов различных сечений [4], так и для согласования диэлектрического волновода с плазмонным волноводом. Например, при помощи численного моделирования было продемонстрировано согласование широкого (500 нм) и узкого (50 нм) плазмонных волноводов с коэффициентом ввода 86% [4].

3. Использование плавно сужающейся волноводной секции

Плавно сужающаяся волноводная секция (рис.1c), вставленная между двумя волноводами различных сечений, отчасти похожа на предыдущий тип УВВ, однако основное ее отличие – она не является резонансной. Физический принцип работы – минимизация обратного отражения и рассеяния при плавном адиабатическом преобразовании волноводной моды. Для сужающейся секции без потерь самый высокий коэффициент ввода достигался бы при бесконечной длине этой секции. На практике же оптимальная длина определяется балансом [5] между поглощением и рассеянием.

Плавно сужающаяся секция может быть выполнена из того же материала, что и сам волновод

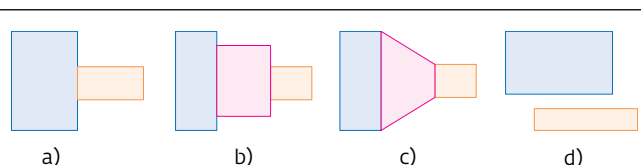


Рис.1. Устройства ввода-вывода на основе а) прямой стыковки, б) резонансной волноводной секции, в) плавно сужающейся волноводной секции, г) направленного ответвителя

Fig.1. In- and out-coupling devices on the basis of а) end-fire connection, б) resonant waveguide section, в) gradually tapered section, г) directional coupler

2. Resonant waveguide section

The concept of using a resonant waveguide section (Fig. 1b) is similar to the ideas of using antireflection coatings with the refractive index n and thickness $\lambda/4n$ (λ is the wavelength in vacuum) in optics and quarter-wavelength transformers in microwaves. Physically, a large transmission is reached by using a resonator for matching the waveguide impedances. The drawback of using a resonator is the working wavelength range narrowing and losses increase due to a lossy material employment inside the resonator. The resonant section may be used for matching plasmonic waveguides of different cross-sections [4] as well as for matching a dielectric waveguide with a plasmonic waveguide. For example, numerical modelling demonstrated matching of a wide (500 nm) and narrow (50 nm) plasmonic waveguides with CE = 86% [4].

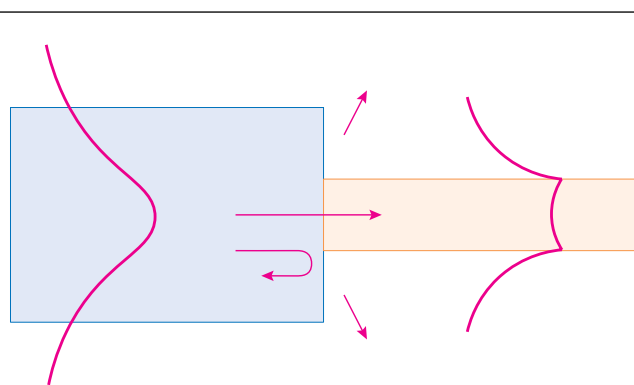


Рис.2. При вводе излучения из широкого волновода в субволновод, в месте стыковки излучение не только проходит, но также частично отражается назад и рассеивается в стороны

Fig.2. Upon radiation coupling from a wide waveguide into a subwavelength waveguide in the point of connection the radiation is not only transmitted, but also partially reflected and scattered



(диэлектрик, металл), а может быть получена из структурированного материала (метаматериала). Диэлектрические плавно сужающиеся волноводы могут быть сделаны путем вытягивания разогретого оптического волокна [6], однако даже сужая тонкий волновод до субволновых размеров, невозможно достичь субволнового размера моды в силу естественного дифракционного ограничения. Короткие обратные диэлектрические сужающиеся секции нашли свое применение и для ввода излучения в фотоннокристаллические волноводы, где их применение позволяет снизить отражение при вводе излучения до 1% [7].

Теоретически были показаны возможности передачи излучения между плазмонными волноводами с КВ около 70% на длине волны 1,5 мкм [1]. Экспериментально измеренный коэффициент ввода из волновода шириной 1500 нм в металлический нанопровод шириной 30 нм составил 56% [5] на длине волны 1,425 мкм.

Использование структурированных метаматериалов в сужающейся секции создает как дополнительные трудности при изготовлении структур, так и дополнительные потери, присущие метаматериалам ввиду резонансных элементов, из которых они состоят. Например, в работе [8] была теоретически показана концентрация излучения до размера $\lambda/30$, однако пропускание составило всего лишь 13%.

Использование плавно сужающейся волноводной секции позволяет достигать чрезвычайно высоких значений напряженности электрического поля как в оптическом [9] так и в терагерцевом [10] диапазонах.

4. УВВ на основе направленного ответвителя

Работа направленного ответвителя (рис.3) основана на гибридизации мод отдельных волноводов при достаточно сильной связи и малом расстоянии между ними. Распространяющаяся мода входного волновода в гибридной секции превращается в линейную комбинацию собственных мод гибридной секции. При распространении мод происходят пространственные биения и максимум энергии наблюдается то в одном, то в другом волноводе. Выбирая длину гибридной секции определенным образом, возможно добиться максимальной передачи энергии из первого волновода во второй. Подобные устройства применяются как в СВЧ технике, так и в оптике (например, сплавные мультиплексоры в волоконной оптике).

3. Gradually tapered waveguide section

Gradually tapered waveguide section (Fig. 1c) between the waveguides of different cross-sections resembles the previous type of IOD, however, the main difference is that the gradually tapered waveguide section is non-resonant. The physical principle of its operation is minimization of the back - and side - scattering upon a gradual adiabatic mode transformation. For a tapered section without losses the largest CE would be reached for an infinite length of the section. In practice, however, the optimal length is determined by the balance [5] between absorption and scattering.

Gradually tapered section can be made from the same material than the waveguide itself (dielectric, metal), but can also be made of a structured material (metamaterial). The dielectric tapered waveguides can be fabricated by pulling a heated optical fiber [6]. Nevertheless, even narrowing down the fiber to a subwavelength size it is not possible to reach the subwavelength size of the mode due to the natural diffraction limit. Short inverse tapers have found their application for light coupling to the photonic crystal waveguides [7]. Their application allows for reducing reflection down to 1%.

It has been shown theoretically the possibility for light transmission with the CE around 70% at the wavelength 1.5 μm [1]. Experimentally measured CE from a waveguide of the width 1500 nm to a metallic nanowire of the width 30 nm was 56% [5] at the wavelength 1.425 μm .

Employment of the structured metamaterials in the tapered section creates additional difficulties in the devices fabrication as well as additional losses related to metamaterials due to the resonant consisting elements. For example, in the work [8] it was demonstrated theoretically light concentration down to the size of $\lambda/30$, however, transmittance was only about 13%.

Employment of the gradually tapered waveguide section also allows for reaching enormously large electric field strength in optical [9] as well as terahertz [10] ranges.

4. In- and out-coupling devices on the basis of a directional coupler

The action of the directional coupler (Fig.3) is based on different waveguides modes hybridization under a sufficiently strong interaction between them. The propagating mode of the input waveguide hybridize in the interaction region and is converted into a linear combination of the hybrid eigenmodes. Upon the modes propagation the spatial beatings occur and the

Подобные устройства для ввода излучения из диэлектрических в плазмонные волноводы были продемонстрированы как теоретически, так и экспериментально [11-13]. Длина области связи в различных системах варьировалась от нескольких микрометров [12] до десятков и даже сотен микрометров [14], в зависимости от типов взаимодействующих волноводов. Теоретически рассчитанный и экспериментально измеренный коэффициент ввода излучения на длине волны 1,55 мкм из кремниевого волновода в щелевой плазмонный волновод составил 60% [12].

В некоторых случаях возможно не только традиционное расположение волноводов рядом друг с другом, но и такая ситуация, когда один волновод проникает в другой. В частности, возможно вставить кремниевый волновод в плазмонный щелевой волновод. Теоретическое значение коэффициента ввода 88% на практике составило всего лишь 35% [15].

УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА НА ОСНОВЕ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ

Рассмотренные в первой части данной статьи [16] устройства ввода-вывода на основе оптически больших линз (поперечные размеры много больше длины волны) позволяют вводить излучение в субволновые волноводы из свободного пространства. Схожую функцию выполняют и УВВ на основе дискретных рассеивателей, отличаясь тем, что отдельные рассеиватели имеют характерные геометрические размеры, сравнимые с длиной волны. Кроме того, УВВ на основе рассеивателей, как правило, хотя и необязательно, интегрированы с самим волноводом, в отличие от линз. Рассмотрим два основных типа УВВ на основе рассеивателей:

- 1) УВВ на основе наноантенн;
- 2) УВВ на основе дифракционных решеток.

1. УВВ на основе наноантенн

Антенна – это устройство, которое преобразует свободно распространяющееся электромагнитное излучение в локализованную форму и наоборот [17, 18]. В таком качестве антенны используются уже более столетия для теле- и радиосвязи, преобразуя электромагнитные волны в моды субволновых волноводов (например, коаксиальных кабелей). Однако использование антенн в оптическом диапазоне началось всего пару десятков лет назад, что было связано с прогрессом технологии нанотехнологии металлических и диэлектрических структур. Строго говоря, большие

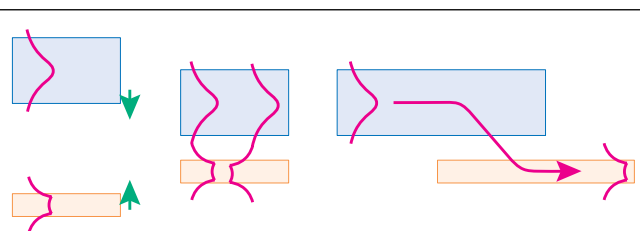


Рис.3. Направленный ответвитель основан на гибридизации мод двух волноводов при взаимодействии между ними, например при их сближении. При определенной длине гибридного участка излучение может быть полностью передано из одного волновода в другой

Fig.3. Directional coupler is based on the modes hybridization of two waveguides upon their interaction, for example, when bringing them close to each other. At a certain length of the hybrid section the radiation can be fully transferred from one waveguide into another

power maximum is observed consequently in the first and then the second waveguide. Appropriate selection of the hybrid section length allows for maximal power transfer from the first waveguide into the second one. Similar devices are applied in microwave engineering as well as optical communication (for example, fused multiplexor in fiber optics).

Similar devices for light coupling from dielectric to plasmonic waveguides were demonstrated theoretically, as well as experimentally [11-13]. The length of the interaction region in various systems varied from a few micrometers [12] to tens and even hundreds of micrometers [14], depending on the types of the interacting waveguides. Numerically computed and experimentally measured coupling efficiency at the wavelength 1.55 μm for coupling from a silicon waveguide to a plasmonic slot waveguide was 60% [12].

In certain cases, it is possible to employ not only a traditional placement of the waveguides "one next to another", but also the situation when one waveguide penetrates into another. For example, it is possible to insert a silicon waveguide into a plasmonic slot waveguide. The theoretical CE=88% was much more modest in experiment (35%) [15].

SCATTERERS BASED IN- AND OUT-COUPLING DEVICES

The IODs considered in the first part of this article [16] based on optically large lenses (the transverse size is much larger than the wavelength) allow for coupling the radiation into subwavelength waveguides from the free space. A similar function can be played by IODs on the basis of discrete scatterers with the

оптические линзы также могут рассматриваться в качестве антенн, однако в данном разделе мы будем понимать под антенной оптически небольшую резонансную частицу. Изначально в качестве антенн рассматривались металлические частицы, однако в последние несколько лет большое внимание привлекли к себе и диэлектрические частицы с высоким показателем преломления [18]. Оптические наноантенны находят применение в спектроскопии, сенсорных устройствах, фотогальванических элементах и микроскопии. Падающее оптическое излучение возбуждает локализованные плазмоны-поляритоны в плазмонных частицах или резонансы Ми в диэлектрических частицах, что позволяет концентрировать электромагнитную энергию в малых объемах пространства (например, в разрезе дипольной антенны), достигая больших значений напряженности электромагнитного поля и использовать это явление для ввода излучения в волновод (рис.4а).

В численном эксперименте был продемонстрирован коэффициент ввода около 10% для дипольной антенны на длине волны 1,55 мкм, подключенной к плазмонному щелевому волноводу [19], а также показано, что коэффициент ввода может быть увеличен до 26% за счет использования дополнительных отражателей [20]. Экспериментально измеренный коэффициент ввода составил 15% [21].

Несмотря на невысокий коэффициент ввода излучения в волновод, оптические антенны имеют важные достоинства. Во-первых, они компактны, что существенно для плотной интеграции оптических элементов. Во-вторых, изменяя геометрический дизайн, можно делать антенны как направленными, так и ненаправленными, а также настраивать их на требуемую длину волны в соответствии с требованиями определенного применения.

2. УВВ на основе дифракционных решеток

Если объединить несколько металлических или диэлектрических антенн в упорядоченный массив, получится своего рода дифракционная решетка, которая также может использоваться в качестве УВВ (рис.4б). В отличие от стандартной оптической дифракционной решетки, состоящей из большого числа нерезонансных элементов (например, длинных линий), решетка из антенн состоит из нескольких маленьких резонансных элементов. Плазмоны, возбуждаемые в каждой металлической антенне, далее распространя-

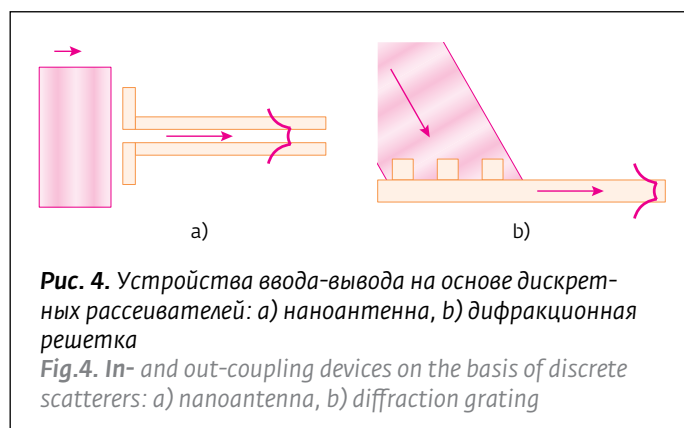


Рис. 4. Устройства ввода-вывода на основе дискретных рассеивателей: а) наноантенна, б) дифракционная решетка

Fig.4. In- and out-coupling devices on the basis of discrete scatterers: a) nanoantenna, b) diffraction grating

difference that the individual scatterers are of the size comparable to the wavelength. Moreover, IODs on the basis of scatterers are, as a rule, integrated together with the waveguide, contrary to lenses. We consider two types of the scatterers based IODs:

1. IODs on the basis of nanoantennas,
2. IODs on the basis of diffraction gratings.

1. IODs on the basis of nanoantennas

Antenna is a device that converts a freely propagating electromagnetic radiation into a localized form and vice versa [17], [18]. For such application the antennas are used for more than a century for TV and radio communication, converting electromagnetic waves into the modes of subwavelength waveguides (for example, coaxial cables). Employment of antennas in the optical range began only a couple of decades ago as the progress in nanofabrication technology allowed for creating fine metallic and dielectric structures. Strictly speaking, large optical lenses can also be considered as antennas, but in this article section we will understand antenna as an optically small resonant particle. Initially, metallic particles were considered as antennas, but in the recent years a great attention is attracted to dielectric particles with large index of refraction [18]. Optical nanoantennas find their application in spectroscopy, sensing, photovoltaics and microscopy. An incident optical radiation excites localized plasmons polaritons in plasmonic particles or Mie resonances in dielectric particles that allows for concentrating electromagnetic energy in small volume (for example, in the slit of the dipole antenna), reaching large values of the electric field strength and coupling radiation into a waveguide (Fig. 4a).

CE around 10% was demonstrated in numerical experiment for a dipole antenna at the wavelength of 1.55 μm , connected to a plasmonic slot waveguide [19]. It was shown that CE can be increased to 26% by using additional reflectors [20]. Experimentally measured CE was 15% [21].

ются в плазмонном волноводе. Очевидно, что для эффективного возбуждения моды необходимо соблюдение фазового условия между антеннами, что определяет величину периода решетки.

Стоит заметить, что дифракционная решетка – один из наиболее популярных способов возбуждения широких кремниевых волноводов из оптического волокна с диаметром моды около 10 мкм на длине волны 1,55 мкм. При этом излучение падает под небольшим углом к нормали к плоскости волновода. Максимальный продемонстрированный коэффициент ввода составил около 70% [22]. Решетки более сложного профиля, нежели линии с равным периодом (аподизированные решетки), продемонстрировали теоретически и экспериментально коэффициент ввода до 87% [23].

Дифракционные решетки могут быть также использованы для плазмонных волноводов. Для широкого волновода была предложена решетка с коэффициентом ввода 68% [24]. Система из нескольких соединенных плазмонных антенн была рассчитана численно и экспериментально измерена при помощи сканирующего ближнеполевого оптического микроскопа [25].

Дифракционные решетки преимущественно представляют из себя периодические массивы дискретных рассеивателей. Было также показано, что при некоторых условиях массивы случайно расположенных рассеивателей также могут использоваться для фокусировки излучения [26] и, соответственно, как УВВ. Очевидно, однако, что достичь таким образом высоких коэффициентов ввода вряд ли возможно.

Despite of a low CE the optical antennas have important advantages. First of all, they are compact that is crucially important for dense integration of optical elements. For the second, by changing the geometrical design the antennas can be tuned to a certain wavelength and made directive or omnidirectional, corresponding to a specific application.

2. IODs on the basis of diffraction gratings

Connecting several metallic or dielectric antennas in an ordered array, one can get a kind of diffraction grating that can also be used as an IOD (Fig. 4b). Contrary to the common optical diffraction grating consisting of a large number of non-resonant elements (for example, long lines), the antennas grating consists of a few small resonant elements. Plasmons excited in each metallic antenna then propagate in a plasmonic waveguide. Obviously, the phase condition should be satisfied for the efficient mode excitation and this determines the period of the grating.

It is worth mentioning that a diffraction grating is one of the most popular methods of excitation of wide silicon waveguides from an optical fiber with the mode diameter of 10 μm at the wavelength 1.55 μm . The radiation is incident under a small angle to the normal to the waveguide plane. The maximal observed CE was about 70% [22]. The grating of a more complicated profile than lines with a constant period (apodized gratings) demonstrated theoretically and experimentally CE up to 87% [23].

The diffraction gratings can be also used for exciting plasmonic waveguides. For a wide waveguide the grating with CE=68% was suggested [24]. The system of



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели три класса устройств ввода-вывода на основе линз, связанных волноводов и дискретных рассеивателей. Для горизонтального ввода излучения (излучение распространяется вдоль волновода) наиболее эффективными и часто используемыми являются УВВ на основе плавно сужающейся волноводной секции, в то время как для вертикального – УВВ на основе дифракционных решеток. Оптические антенны в качестве УВВ имеют хоть и невысокую эффективность, но, что немаловажно, компактный размер. УВВ на основе диэлектрических линз хотя и имеют высокий коэффициент пропускания, но не позволяют достаточно сфокусировать излучение для эффективного ввода в субволновой волновод. Линзы из материала с гиперболической дисперсией, напротив, позволяют достигать субдифракционной фокусировки, но имеют малый коэффициент пропускания.

На практике для ввода излучения в субволновой волновод могут одновременно использоваться несколько типов УВВ. Например, излучение, предварительно сфокусированное при помощи линзы, может вводиться в плазмонный волновод при помощи дифракционной решетки, а далее сжиматься при помощи плавно сужающейся секции [5]. Кроме комбинации отдельных типов УВВ возможно и создание УВВ как единого устройства со сложной геометрией. Действительно, можно задать условия на распределение входного (например, мода оптического волокна) и выходного (например, мода металлического нанопровода) электромагнитного поля и поручить компьютеру определение геометрического расположения металла и диэлектрика внутри УВВ, которое обеспечивает требуемый коэффициент ввода. Подобные задачи решает топологическая оптимизация [24], при этом оптимальная геометрия устройств может быть весьма замысловатой, но реалистичной с точки зрения изготовления.

Помимо просто ввода излучения в нановолноводы, вышеперечисленные УВВ, содержащие нелинейные материалы с перестраиваемыми свойствами, могут работать в качестве активных элементов, таких как переключатели, модуляторы, преобразователи мод и пр. Эта идея соответствует глобальному направлению развития как УВВ, так и прочих направлений нанопотоники, а именно улучшению технологий нанофабрикации и использованию новых материалов.

several connected plasmonic antennas was modelled numerically and characterized experimentally with a scanning near-field optical microscope [25].

The diffraction gratings are predominantly regular arrays of discrete scatterers. It was shown that under certain conditions the arrays of randomly placed scatterers can also be used for light focusing [26] and, consequently, as IODs. It is, however, obvious, that large CE cannot be reached in this way.

CONCLUSIONS

We considered three classes of in- and out-coupling devices on the basis of lenses, coupled waveguides and discrete scatterers. For the horizontal radiation coupling (the radiation propagates along the waveguide) the most efficient are the IODs on the basis of a gradual tapered section, while for the vertical coupling the IODs on the basis of diffraction gratings. Optical antennas as IODs even not being the most efficient are the most compact. The IODs on the basis of dielectric lenses have the largest transmission, but do not allow for focusing radiation for efficient coupling to a subwavelength waveguide. Contrary to this, the lenses with hyperbolic dispersion allow for subwavelength focusing, but have a small transmission coefficient.

In experiment, several types of IODs can be simultaneously used for the radiation coupling to a subwavelength waveguide. For example, the radiation initially pre-focused with a lens can be coupled to a plasmonic waveguide with a diffraction grating and then compressed with a gradually tapered section [5]. Except for combining various IODs it is possible to create an IOD as a single device with a complex geometry. For example, it is possible to set the conditions for the input (for example, the mode of an optical fiber) and output (for example, the mode of a metallic nanowire) electromagnetic field profiles and then to ask a computer to determine the geometric distribution of metal and dielectric inside the IOD that provides the desired coupling efficiency. Such problems can be solved with the algorithms of topological optimization [24] and the optimal geometry can be very sophisticated though realistic for fabrication.

Except for the light coupling to nanowaveguides, the abovementioned IODs containing nonlinear materials with tunable properties can work as active elements such as switches, modulators, mode converters etc. This idea corresponds to the global direction of the IODs development as well as the whole nanophotonics development, namely, the fabrication technology improvement and employment of new materials.



ЛИТЕРАТУРА

1. **Song Y., Wang J., Li Q., Yan M., Qiu M.** Broadband coupler between silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide. – *Opt. Express*, Jun. 2010. v.18, № 12, p.13173.
2. **Chen X.W., Sandoghdar V., Agio M.** Highly efficient interfacing of guided plasmons and photons in nanowires. – *Nano Lett.*, 2009, v.9, № 11, p.3756–3761.
3. **Han Z., Elezzabi A.Y., Van V.** Experimental realization of subwavelength plasmonic slot waveguides on a silicon platform. – *Opt. Lett.*, Feb. 2010, v.35, № 4, p.502–504.
4. **Ginzburg P. Orenstein M.** Plasmonic transmission lines: from micro to nano scale with $\lambda/4$ impedance matching. – *Opt. Express*, May 2007, v.15, № 11, p.6762–7.
5. **Zenin V.A., Andryieuski A., Malureanu R., Radko I.P., Volkov V.S., Gramotnev D.K., Lavrinenko A.V., Bozhevolnyi S.I.** Boosting Local Field Enhancement by on-Chip Nanofocusing and Impedance-Matched Plasmonic Antennas. – *Nano Lett.*, 2015, v.15, № 12, p.8148–8154.
6. **Brambilla G., Finazzi V., Richardson D.J.** Ultra-low-loss optical fiber nanotapers. – *Opt. Express*, 2004, v. 12, № 10, p. 4421–4425.
7. **Tran Q. V., Combrie S., Colman P., De Rossi A.** Photonic crystal membrane waveguides with low insertion losses. – *Appl. Phys. Lett.*, 2009, v.95, p.061105.
8. **Govyadinov A., Podolskiy V.** Metamaterial photonic funnels for subdiffraction light compression and propagation. – *Phys. Rev. B*, Apr. 2006, v.73, № 15, p.155108.
9. **Park I.-Y., Kim S., Choi J., Lee D.-H., Kim Y.-J., Kling M.F., Stockman M.I., Kim S.-W.** Plasmonic generation of ultrashort extreme-ultraviolet light pulses. – *Nat. Photonics*, 2011, v.5, № 11, p.677–681.
10. **Iwaszczuk K., Andryieuski A., Lavrinenko A., Zhang X., Jepsen P.U.** Terahertz field enhancement to the MV/cm regime in a tapered parallel plate waveguide. – *Opt. Express*, 2012, v.20, № 8, p.1289–1295.
11. **Yan R., Pausauskie P., Huang J., Yang P.** Direct photonic-plasmonic coupling and routing in single nanowires. – *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, Dec. 2009, v.106, № 50, p.21045–50.
12. **Delacour C., Blaize S., Grosse P., Fedeli J.M., Bruyant A., Salas-Montiel R., Lerondel G., Chelnokov A.** Efficient Directional Coupling between Silicon and Copper Plasmonic Nanoslot Waveguides: toward Metal-Oxide-Silicon Nanophotonics. – *Nano Lett.*, Jul. 2010, v.10, p.2922–2926.
13. **Li Q., Wang S., Chen Y., Yan M., Tong L., Qiu M., Synthesization A. S. N.** Experimental Demonstration of Plasmon Propagation, Coupling, and Splitting in Silver Nanowire at 1550-nm Wavelength. – *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, v.17, № 4, p.1107–1111.
14. **Dong S., Ding H., Liu Y., Qi X.** Investigation of evanescent coupling between tapered fiber and a multimode slab waveguide. – *Appl. Opt.*, Apr.2012, v.51, № 10, p.C152–7.
15. **Tian J., Yu S., Yan W., Qiu M.** Broadband high-efficiency surface-plasmon-polariton coupler with silicon-metal interface. – *Appl. Phys. Lett.*, 2009, v.95, № 1, p.013504.
16. **Андреевский А.** Устройства ввода-вывода оптического излучения для субволновых волноводов. Часть 1. – *Фотоника*, 2016, № 1, p.98–110.
17. **Novotny L. and N. van Hulst.** Antennas for light. – *Nat. Photonics*, Feb. 2011, v.5, № 2, p.83–90.
18. **Краснок А.Е., Максимов И.С., Денисюк А.И., Белов П.А., Мирошниченко А.Е., Симовский К.Р., Кившарь Ю.С.** Оптические наноантенны. – *Успехи физических наук*, 2013, v.183, p.561–589.
19. **Wen J., Romanov S., Peschel U.** Excitation of plasmonic gap waveguides by nanoantennas. – *Opt. Express*, 2009, v.17, № 8, p.5925–5932.
20. **Andryieuski A., Malureanu R., Biagi G., Holmgaard T., Lavrinenko A.** Compact dipole nanoantenna coupler to plasmonic slot waveguide. – *Opt. Lett.*, Mar. 2012, v.37, № 6, p.1124–6.
21. **Wen J., Banzer P., Kriesch A., Ploss D., Schmauss B., Peschel U.** Experimental cross-polarization detection of coupling far-field light to highly confined plasmonic gap modes via nanoantennas. – *Appl. Phys. Lett.*, 2011, v.98, № 10, p.101109.
22. **Vermeulen D., Selvaraja S., Verheyen P., Lepage G., Bogaerts W., Absil P., Van Thourhout D., Roelkens G., Van Thourhout D.** High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible silicon-on-insulator platform. – *Opt. Express*, Aug. 2010, v. 18, № 17, p.18278–18283.
23. **Zaoui W. S., Kunze A., Vogel W., Berroth M., Butschke J., Letzkus F., Burghartz J.** Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits. – *Opt. Express*, Jan. 2014, v.22, № 2, p.1277.
24. **Andkjær J., Nishiwaki S., Nomura T., Sigmund O.** Topology optimization of grating couplers for the efficient excitation of surface plasmons. – *JOSA B*, 2010, v.27, № 9, p.1828–1832.
25. **Andryieuski A., Zenin V.A., Malureanu R., Volkov V.S., Bozhevolnyi S.I., Lavrinenko A.V.** Direct characterization of plasmonic slot waveguides and nanocouplers. – *Nano Lett.*, 2014, v.14, № 7, p.3925–3929.
26. **Vellekoop I.M., Lagendijk A., Mosk A.P.** Exploiting disorder for perfect focusing. – *Nat. Photonics*, 2010, v. 4, № February, p.320–322.