

УДК 004.085

**Е. М. Морозов, А. С. Лапчук**

Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

## **Высокоэффективное возбуждение ближнеполевого зонда на основе оптической плазмонной микрополосковой линии с использованием коннектора SU-8**

*Предложена и исследована конструкция эффективного торцевого соединения оптоволоконного зонда с ближнеполевым зондом на основе оптической плазмонной микрополосковой линии (БЗОПМЛ) с использованием коннектора SU-8. На основе численного анализа была проведена оптимизация предложенной конструкции коннектора SU-8 и показано, что эффективность передачи энергии и пропускание коннектора SU-8 на длине волны лазерного излучения 405 нм составляют 79 % и 73 % соответственно. Рассчитанное значение эффективности возбуждения фундаментальной квази-ТМ<sub>00</sub>-моды в БЗОПМЛ составило 68 %. Предложенная конструкция соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ с использованием коннектора SU-8 и принцип ее оптимизации могут быть использованы при разработке ближнеполевых плазмонных устройств.*

**Ключевые слова:** ближнеполевые плазмонные устройства, ближнеполевой зонд на основе оптической плазмонной микрополосковой линии, коннектор SU-8, эффективность возбуждения.

### **Введение**

В последнее время было предложено и разработано множество ближнеполевых нанофотонных устройств, способных поддерживать поверхностные плазмонные моды с высокой локализацией электромагнитного поля и большой длиной распространения [1–4]. Применение таких устройств имеет огромный потенциал в оптической микроскопии, оптической и магнитооптической записи информации, литографии, биологии, химии, системах связи, интегральных оптических схемах. Одним из предложенных и разрабатываемых сегодня плазмонных устройств является ближнеполевой зонд на основе оптической плазмонной микрополосковой линии (БЗОПМЛ) [5, 6]. Наряду с задачей повышения оптической эффективности ближнеполевых нанофотонных устройств [7] стоит задача их эффективного возбуждения, т.е. эффективного «связывания» электромагнитного поля источника в

© Е. М. Морозов, А. С. Лапчук

дальнем поле (например, лазера) и электромагнитного поля моды, способной распространяться в наноустройстве. Известно, что для эффективного возбуждения поверхностного плазмон-поляритона необходимо преодолеть несоответствие импульса возбуждающего фотона и коротковолновых колебаний поверхностного плазмон-поляритона. На сегодня можно выделить три общих подхода к решению этой задачи:

— возбуждение посредством направления излучения под определенным углом на рифленую поверхность металла или призму, имеющую оптический контакт с тонкой металлической пленкой [8, 9];

— размещение вблизи металлической поверхности фото- или электрически возбуждаемых люминесцирующих молекул или нанокристаллов [10–12];

— возбуждение с торца волновода (end-fire coupling), т.е. возбуждение вдоль направления распространения моды [13], и вертикальное возбуждение, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению распространения моды [14]. В основе этого подхода лежит соединение двух волноводов, имеющих разные показатели модальности (modal index), при этом несоответствие импульсов мод двух волноводов приводит к потерям на отражение.

В данной работе предлагается конструкция эффективного торцевого соединения БЗОПМЛ с оптоволоконным зондом с использованием коннектора SU-8 и будет проведен численный анализ параметров предложенной конструкции.

### Конструкция эффективного торцевого соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ

Общий вид коннектора SU-8 представлен на рис. 1.

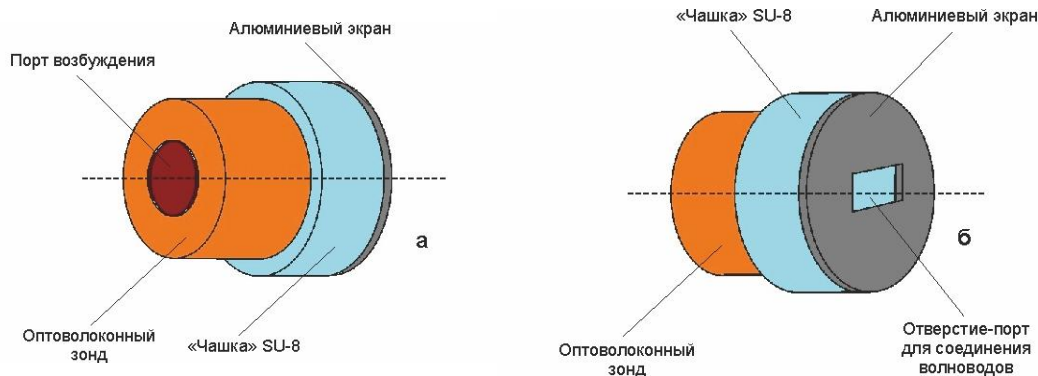


Рис. 1. Общий вид коннектора SU-8: а) вид со стороны порта возбуждения; б) вид со стороны отверстия-порта

Коннектор состоит из оптоволоконного зонда (изготовленного из плавленного кварца), покрытия из фотопластичного материала SU-8 и экрана из алюминия, в котором сделано отверстие-порт. Порт возбуждения имитирует лазерный пучок соответствующего диаметра. Через отверстие-порт происходит соединение оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ.

На рис. 2 представлен первый технологический способ изготовления предложенного коннектора SU-8. 1-й этап: цилиндру из материала SU-8 при помощи обычной литографии придается форма «чашки». 2-й этап: на плоскую поверхность «чашки» SU-8 наносится слой негативного фоторезиста (НФ) и лазером облучается область необходимых размеров. 3-й этап: травителем удаляется необлученный слой НФ. 4-й этап: образованная поверхность металлизуется алюминием. 5-й этап: удаление алюминиевого слоя на выступе. 6-й этап: с помощью ионно-лучевого травления травится облученная область НФ до «чашки» SU-8. 7-й этап: оптоволоконный зонд вставляется в «чашку» SU-8 на оптический адгезив NOA73 — клей, который укрепляется ультрафиолетовым светом и хорошо согласовывает показатели преломления оптоволоконного зонда и «чашки» SU-8 ( $n = 1,47$  для оптоволокна,  $n = 1,56$  для клея NOA73 и  $n = 1,8$  для материала SU-8).

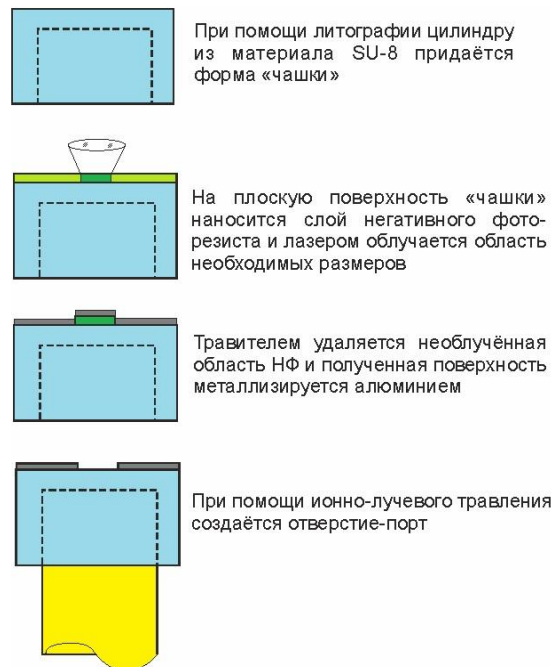


Рис. 2. Процесс изготовления коннектора SU-8

Второй способ изготовления коннектора имеет меньшее количество технологических шагов: 1 — изготовление «чашки» SU-8; 2 — нанесение на плоскую поверхность «чашки» алюминиевой пленки; 3 — изготовление отверстия-порта необходимых размеров в алюминиевой пленке с помощью зонда атомно-силового микроскопа; 4 — соединение оптоволоконного зонда с «чашкой» при помощи клея.

На рис. 3 представлено схематическое изображение коннектора SU-8 со следующими условными обозначениями:  $d_1$  — диаметр порта возбуждения (лазерного пучка);  $d_2$  — диаметр оптоволоконного зонда и, соответственно, внутренний диаметр «чашки» SU-8;  $d_3$  — внешний диаметр «чашки» SU-8 и, соответственно, диаметр алюминиевого экрана;  $a$  и  $u$  — ширина и высота отверстия-порта соответственно;  $L_1$  — длина оптоволоконного зонда;  $L_2$  — длина «чашки» SU-8;  $L_3$  —

толщина алюминиевого экрана;  $L_4$  — расстояние между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном,  $L_5$  — длина БЗОПМЛ.

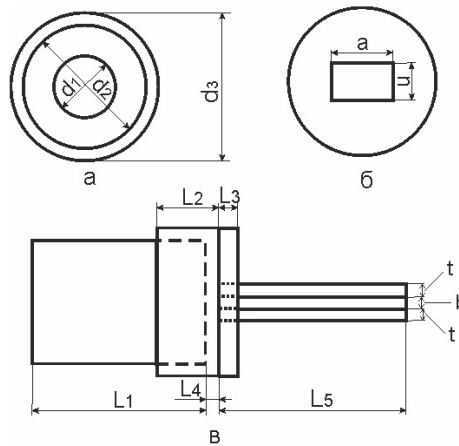


Рис. 3. Схематическое изображение коннектора: а) вид со стороны возбуждающего порта; б) вид со стороны отверстия-порта; в) вид сбоку (с БЗОПМЛ)

### Анализ параметров коннектора SU-8

Прежде чем приступить к исследованию использования коннектора SU-8 для эффективного возбуждения БЗОПМЛ, необходимо отдельно, т.е. без БЗОПМЛ, исследовать зависимость коэффициента эффективности передачи энергии и пропускной способности коннектора SU-8 от его конструктивных параметров, указанных на рис. 3. Моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD) на длине волны лазерного излучения 405 нм ( $f = 740$  ТГц). Предполагалось, что оптоволоконно изготовлено из плавленного кварца ( $\epsilon_{quartz} = 2,158$ ), металлический экран из алюминия ( $\epsilon_{Al} = -24 + i5$ ).

Расположение контрольных площадок, с помощью которых измерялись потоки энергии, показаны на рис. 4.

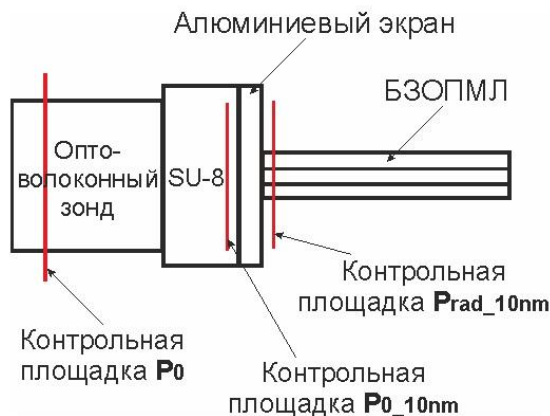


Рис. 4. Расположение контрольных площадок

Коэффициент эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  через отверстие-порт определяется по формуле

$$K_{eff\_1} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

где  $P_2$  — поток энергии через квадратную контрольную площадку  $P_{rad\_10nm}$ , расположенной на расстоянии 10 нм за алюминиевым экраном и имеющей размеры  $700 \times 700$  нм<sup>2</sup>;  $P_1$  — поток энергии через круглую контрольную площадку  $P_{0\_10nm}$ , расположенную на расстоянии 10 нм перед алюминиевым экраном и имеющую диаметр 1000 нм. Поток энергии  $P_1$  определялся с учетом отражения волны от алюминиевого экрана через коэффициент отражения по мощности  $R_1^2$  в области контрольной площадки  $P_{0\_10nm}$ . В свою очередь, коэффициент отражения по мощности  $R_1^2$  определялся через коэффициент стоячей волны  $K_{SW}$ , возникающей в коннекторе SU-8.

На рис. 5 показана зависимость коэффициента эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  и коэффициента отражения по мощности  $R_1^2$  в области контрольной площадки  $P_{0\_10nm}$  от толщины алюминиевого экрана  $L_3$ .

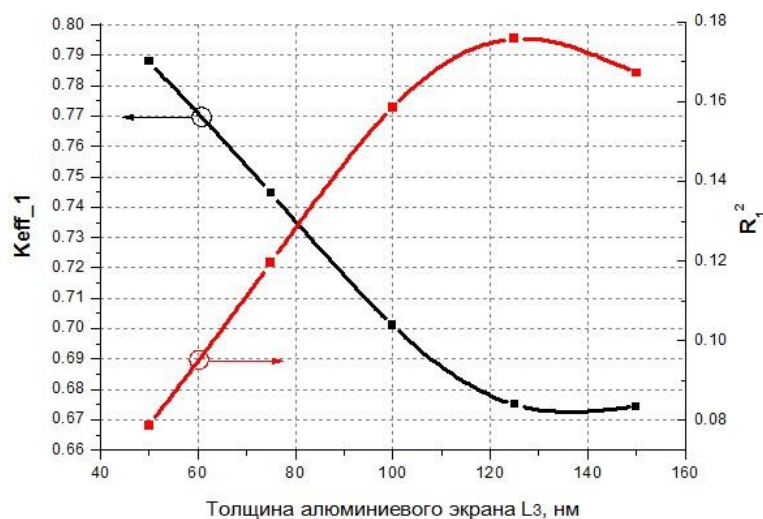


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  и коэффициента отражения по мощности  $R_1^2$  от толщины алюминиевого экрана  $L_3$ :  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_4 = 100$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

Отверстие-порт в данном случае можно рассматривать как отрезок линии, разомкнутой на конце (сопротивление нагрузки по порядку величины равно волновому сопротивлению свободного пространства), с поперечными размерами  $a = 500$  нм,  $u = 300$  нм и длиной  $L_3$ . В центральной точке контрольной площадки

$P_{0\_10nm}$  будут наблюдаться одна падающая волна и две отраженные волны — первая, отраженная на границы раздела «чашка» SU-8 / алюминиевый экран, и вторая, отраженная на границы раздела алюминиевый экран / свободное пространство (на конце отверстия-порта). Таким образом, при изменении длины отрезка  $L_3$  будет изменяться и фаза второй отраженной волны, с которой она приходит в точку измерения  $P_{0\_10nm}$ . Это будет приводить к изменению значения суммарного электрического поля в этой точке и, соответственно, потока энергии  $P_{0\_10nm}$ , что и можно наблюдать на рис. 5. При толщине алюминиевого экрана  $L_3 = 50$  нм коэффициент эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  составляет 79 %.

На рис. 6 показана зависимость коэффициента эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  и коэффициента отражения по мощности  $R_1^2$  в области контрольной площадки  $P_{0\_10nm}$  от расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $L_4$  при толщине алюминиевого экрана  $L_3 = 50$  нм.

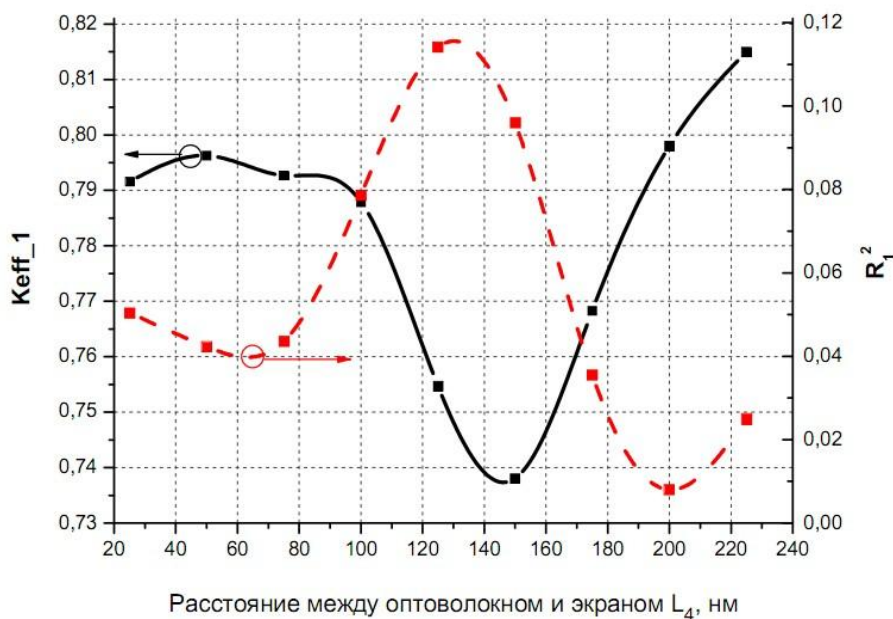


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи энергии  $K_{eff\_1}$  и коэффициента отражения по мощности  $R_1^2$  от расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $L_4$ :  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

Из рис. 5 и 6 видно, что при значениях величин  $L_3 = 50$  нм и  $L_4 = 100$  нм коэффициент эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  составляет 79 %, поэтому эти значения были выбраны для проведения дальнейших исследований.

Кроме того, была определена пропускная способность  $K_{trans}$  коннектора SU-8, которая определяет какая часть входной энергии достигает отверстия-порта, по формуле

$$K_{trans} = \frac{P_1}{P_0}, \quad (2)$$

где  $P_1$  — поток энергии через круглую контрольную площадку  $P_{0\_10nm}$ , расположенной на расстоянии 10 нм перед алюминиевым экраном и имеющей диаметр 1000 нм. Поток энергии  $P_1$  определялся с учетом отражения волны от алюминиевого экрана через коэффициент отражения по мощности  $R_1^2$  в области контрольной площадки  $P_{0\_10nm}$ .  $P_0$  — поток энергии через квадратную контрольную площадку  $P_0$ , расположенную на расстоянии 100 нм от порта возбуждения и имеющую размеры  $1050 \times 1050$  нм<sup>2</sup>. Поток энергии  $P_0$  определялся с учетом отражения волны через коэффициент отражения по мощности  $R_0^2$  в области контрольной площадки  $P_0$ . Значение коэффициента отражения по мощности  $R_0^2$  отличается от коэффициента отражения по мощности  $R_1^2$  в связи с тем, что частичное отражение волны наблюдается также и от границы раздела оптоволоконный зонд-«чашка» SU-8. На рис. 7 показана зависимость  $K_{trans}$  и  $R_0^2$  от расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $L_4$  при толщине алюминиевого экрана  $L_3 = 50$  нм.

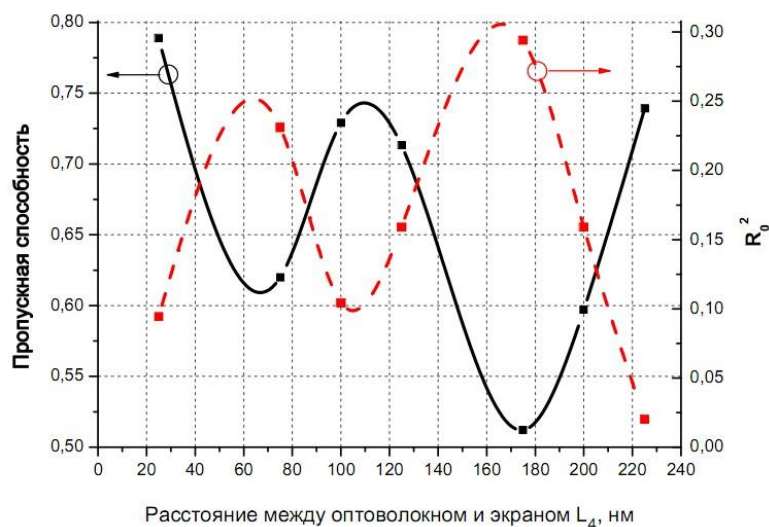


Рис. 7. Зависимость пропускной способности коннектора  $K_{trans}$  и коэффициента отражения по мощности  $R_0^2$  от расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $L_4$ :  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

Из рис. 7 видно, что пропускная способность  $K_{trans}$  составляет 73 % при  $L_3 = 50$  нм и  $L_4 = 100$  нм. Также следует отметить, что  $K_{trans}$  и  $R_0^2$  изменяются по гармоническому закону с изменением расстояния  $L_4$ . Причину гармонической зависимости  $K_{trans}(L_4)$  можно выяснить, если исследовать изменение сдвига фазы

электрического поля в точке измерения  $P_0$  в зависимости от приращения расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $\Delta L_4$ . Зависимость фазового сдвига электрического поля в области контрольной площадки  $P_0$  от приращения  $\Delta L_4$  показана на рис. 8, из которого можно увидеть, что фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  электрического поля также изменяется по гармоническому закону с изменением приращения расстояния  $\Delta L_4$ , при этом размах фазового сдвига достигает  $45^\circ$ . Таким образом, можно сделать вывод, что именно это изменение фазы электрического поля по гармоническому закону в точке измерения  $P_0$  приводит к изменению  $K_{trans}$  и  $R_0^2$  по гармоническому закону с изменением расстояния  $L_4$ .

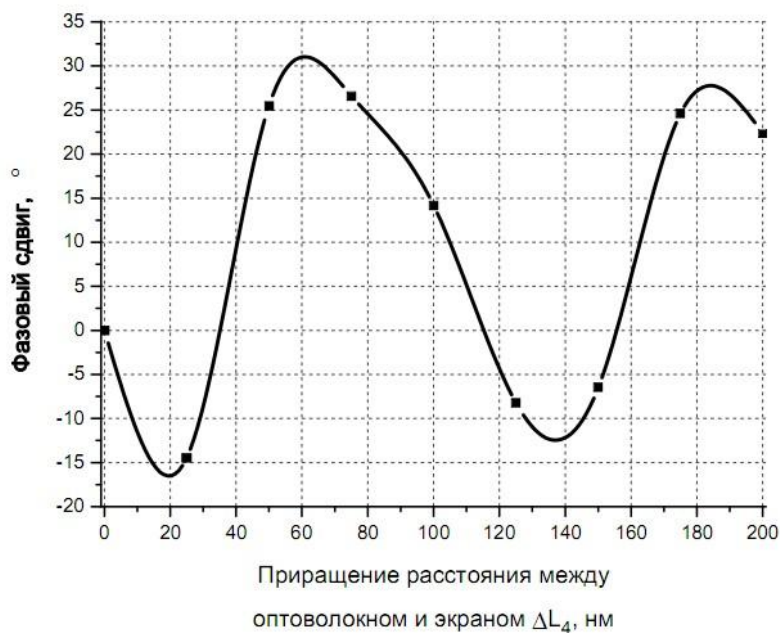


Рис. 8. Зависимость сдвига фазы электрического поля  $\Delta\varphi$  в волноводе в области контрольной площадки  $P_0$  от величины приращения расстояния между оптоволоконным зондом и алюминиевым экраном  $\Delta L_4$  при начальном значении  $L_4 = 25$  нм:  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

На рис. 9 показана зависимость коэффициента эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  через отверстие-порт от диаметра лазерного пятна  $d_1$ , падающего на торец (основу) оптоволоконного зонда.

Из рис. 9 видно, что коэффициент эффективности  $K_{eff\_1}$  монотонно увеличивается с увеличением диаметра лазерного пятна  $d_1$  и при  $d_1 = 600$  нм (что соответствует диаметру лазерного пучка формата Blu-ray) составляет 79 % (-1,04 dB). Распределение электрического поля и потока энергии в коннекторе SU-8 и в свободном пространстве за ним представлено на рис. 10.



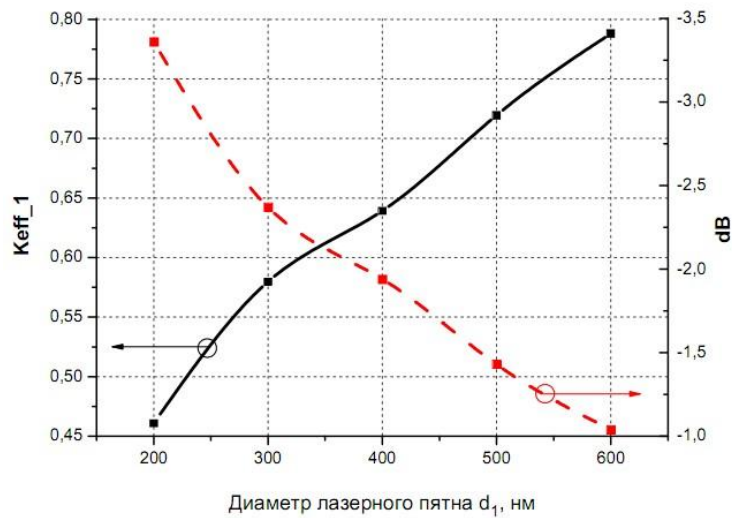


Рис. 9. Зависимость коэффициента эффективности передачи энергии  $K_{eff\_1}$  от диаметра лазерного пятна  $d_1$ :  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $L_4 = 100$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

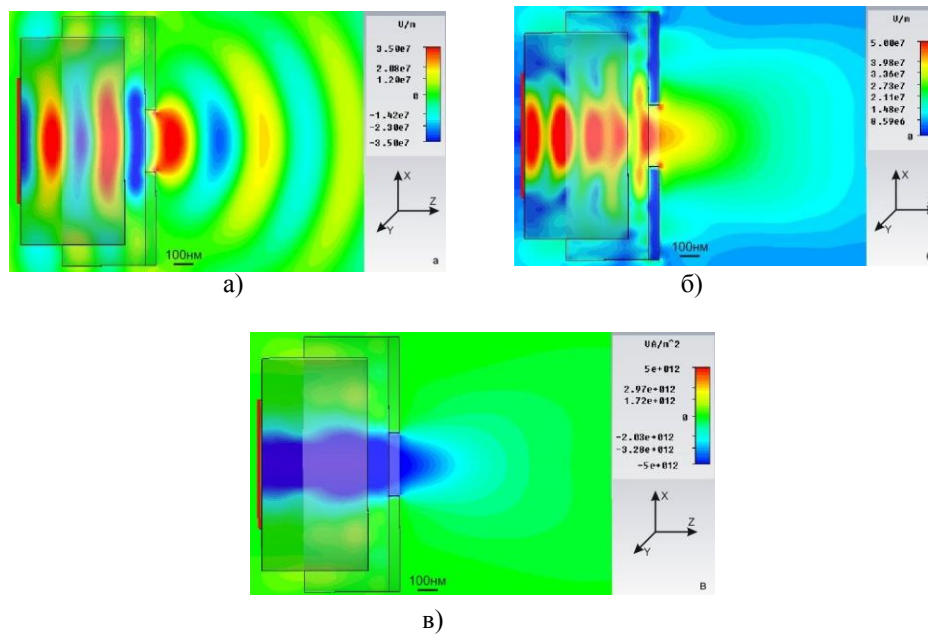


Рис. 10. Распределение электрического поля и потока энергии в коннекторе SU-8 и в свободном пространстве: а)  $X$ -компонента электрического поля; б) абсолютное значение электрического поля; в)  $Z$ -компонента вектора Пойтинга:  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $L_4 = 100$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм

### Анализ эффективности возбуждения фундаментальной моды БЗОПМА с использованием коннектора SU-8

Далее к коннектору SU-8 через отверстие-порт был присоединен БЗОПМЛ (рис. 3,в). Размеры отверстия-порта  $a$  и  $u$  были выбраны исходя из размеров изго-

товленного экспериментального наноустройства [15]. Поскольку нас интересовала непосредственно эффективность возбуждения фундаментальной моды в БЗОПМЛ, то БЗОПМЛ был промоделирован в виде регулярной линии с размерами основания реального устройства:  $b = 200$  нм,  $t = 50$  нм,  $a = 500$  нм,  $L_5 = 1000$  нм; материалы БЗОПМЛ: плавленый кварц (центральный слой) и алюминий (верхний и нижний слой). Эффективность возбуждения определялась по следующей формуле:

$$K_{eff\_2} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3)$$

где  $P_2$  — поток энергии через квадратную контрольную площадку  $P_{rad\_10nm}$ , расположенной на расстоянии 10 нм за алюминиевым экраном и имеющей размеры  $700 \times 700$  нм<sup>2</sup>,  $P_1$  — поток энергии через круглую контрольную площадку  $P_{0\_10nm}$ , расположенную на расстоянии 10 нм перед алюминиевым экраном и имеющую диаметр 1000 нм. Поток энергии  $P_1$  определялся с учетом отражения волны от алюминиевого экрана через коэффициент отражения по мощности  $R_1^2$  в области контрольной площадки  $P_{0\_10nm}$ . Формула (3) аналогична формуле (1), но в данном случае в исследуемую модель был добавлен БЗОПМЛ. На рис. 11 показано распределение электрического поля и потока энергии в коннекторе SU-8 и БЗОПМЛ.

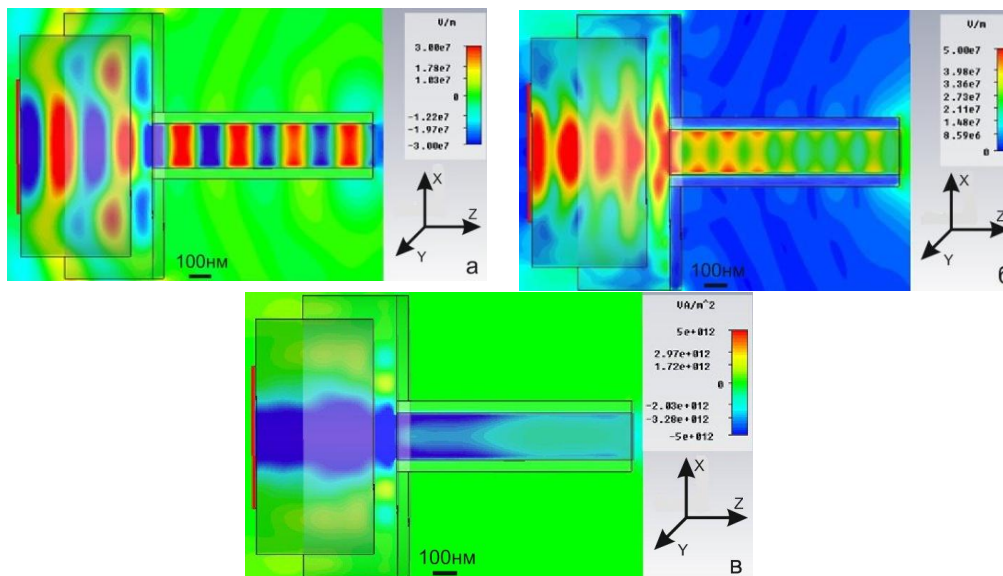


Рис. 11. Распределение электрического поля и потока энергии в коннекторе SU-8 и БЗОПМЛ:  
 а)  $X$ -компонента электрического поля; б) абсолютное значение электрического поля;  
 в)  $Z$ -компонента вектора Пойтинга:  $d_1 = 600$  нм;  $d_2 = 1000$  нм;  $d_3 = 1200$  нм;  $L_1 = 500$  нм;  
 $L_2 = 400$  нм;  $L_3 = 50$  нм;  $L_4 = 100$  нм;  $L_5 = 1000$  нм;  $a = 500$  нм;  $u = 300$  нм;  $b = 200$  нм;  $t = 50$  нм

На рис. 11,*а* можно отчетливо наблюдать фундаментальную квази-ТМ<sub>00</sub>-моду, распространяющуюся вдоль БЗОПМЛ в направлении +z. Рассчитанная по формуле (3) эффективность возбуждения БЗОПМЛ с параметрами, указанными в описании рис. 11, составила 68 % (–1,69 dB). Рассчитанное значение эффективности возбуждения БЗОПМЛ показало эффективность применения предложенной конструкции соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ.

## Выводы

Наряду с задачей повышения оптической эффективности ближнеполевых плазмонных устройств стоит задача эффективного их возбуждения. В данной работе была предложена, описана технология изготовления и исследована конструкция эффективного торцевого соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ с использованием коннектора SU-8. На основе численного анализа была проведена оптимизация предложенной конструкции коннектора SU-8 и показано, что эффективность передачи энергии и пропускание коннектора SU-8 на длине волны лазерного излучения 405 нм составляют 79 % и 73 % соответственно. Рассчитанное значение эффективности возбуждения фундаментальной квази-ТМ<sub>00</sub>-моды в БЗОПМЛ составило 68 %, что показало эффективность применения предложенной конструкции соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ. Предложенная конструкция соединения оптоволоконного зонда с БЗОПМЛ с использованием коннектора SU-8 и принцип ее оптимизации могут быть использованы при разработке ближнеполевых плазмонных устройств.

1. *Gramotnev D.K.* Plasmonics beyond the diffraction limit / D.K. Gramotnev, S.I. Bozhevolnyi // *Nature Photonics*. — 2010. — Vol. 4. — P. 83–91.
2. *Lapchuk A.S.* Mode propagation in optical nanowaveguides with dielectric cores and surrounding metal layers / A.S. Lapchuk, D.H. Shin, H.-S. Jeong [et al.] // *Appl. Opt.* — 2005. — Vol. 44(35). — P. 7522–7531.
3. *Gramotnev D.K.* Nanofocusing of electromagnetic radiation / D.K. Gramotnev, S.I. Bozhevolnyi // *Nature Photonics*. — 2014. — Vol. 8. — P. 13–22.
4. *Berini P.* Long-range surface plasmon polaritons / P. Berini // *Adv. Opt. Photon.* — 2009. — Vol. 1. — P. 484–588.
5. *Lapchuk A.S.* Numerical simulation of characteristics of near-field microstrip probe having pyramidal shape / A.S. Lapchuk, S.-K. Yun, V. Yurlov [et al.] // *JOSA A*. — 2007. — Vol. 24 (8). — P. 2407–2417.
6. *Analysis of near-field method for optical data storage using microstrip probe under illumination and illumination-collection mode* / Ye.M. Morozov, A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov, A.S. Lapchuk // *Proc. SPIE 9201, Optical Data Storage 2014*. — 2014. — Article ID 920111. — 14 p.
7. *Lapchuk A.S.* Estimation of optical efficiency of a near-field optical microscope on the basis of a simplified mathematical model / A.S. Lapchuk // *J. Opt. A: Pure Appl.* — 2001. — Vol. Opt. 3. — P. 455–459.
8. *Ditlbacher H.* Efficiency of local light-plasmon coupling / H. Ditlbacher, J.R. Krenn, A. Hohe-nau, A. Leitner, and F.R. Aussenegg // *Appl. Phys. Lett.* — 2003. — Vol. 83(18). — P. 3665–3667.

9. Raether H. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings / H. Raether. — Springer-Verlag. — 1988 — 135 p.
10. Andrew P. Energy transfer across a metal film mediated by surface plasmon polaritons / P. Andrew, W.L. Barnes // Science. — 2004. — Vol. 306(5698). — P. 1002–1005.
11. Surface plasmon mediated emission from organic light-emitting diodes / P.A. Hobson, S. Wedge, J.A. Wasey [et al.] // Adv. Mater. — 2002. — Vol. 14(19). — P. 1393–1396.
12. A silicon-based electrical source of surface plasmon polaritons / R.J. Walters, R.V.A. van Loon, I. Brunets [et al.] // Nat. Mater. — 2010. — Vol. 9(1). — P. 21–25.
13. Kim S.K. An integrated surface-plasmon source / S.K. Kim, I. Vurgaftman, R.A. Flynn [et al.] // Optics Express. — 2010. — Vol. 18(10). — P. 10609–10615.
14. Kinzel E. High efficiency excitation of plasmonic waveguides with vertically integrated resonant bowtie apertures / E. Kinzel, X. Xu // Optics Express. — 2009. — Vol. 17(10). — P. 8036–8045.
15. Nanofocusing in a metal–insulator–metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper / H. Choo, M.-K. Kim, M. Staffaroni [et al.] // Nature Photonics. — 2012. — Vol. 6. — P. 838–844.

Поступила в редакцию 02.03.2015