

# ЭКСТРЕМАЛЬНО БОЛЬШОЕ ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА НАНООТВЕРСТИЕМ ВНУТРИ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

*П. Н. Мелентьев<sup>a,\*</sup>, А. Е. Афанасьев<sup>a</sup>, А. А. Кузин<sup>b</sup>,  
А. В. Заблоцкий<sup>b</sup>, А. С. Батурин<sup>b</sup>, В. И. Балыкин<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup> Институт спектроскопии Российской академии наук  
142190, Троицк, Московская обл., Россия*

*<sup>b</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)  
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 25 ноября 2011 г.

Представлены экспериментальные результаты по пропусканию света через единичные наноотверстия диаметром, существенно меньшим длины волны света (диаметр наноотверстий меньше, чем  $\lambda/10$ ). Наноотверстия изготовлены в пленке золота, являющейся частью фотонного кристалла, формирующего микрорезонатор с добротностью  $Q \approx 100$ . Продемонстрировано 28-кратное увеличение пропускания света через наноотверстие внутри такого микрорезонатора, по сравнению с пропусканием через наноотверстие в золотой пленке. Обнаружена высокая спектральная селективность пропускания света через наноотверстие, которая характеризуется двумя характерными особенностями: 1) максимум пропускания расположен на длине волны резонанса микрорезонатора, 2) ширина пика на полувысоте составляет значение около  $\lambda/90$ .

## 1. ВВЕДЕНИЕ

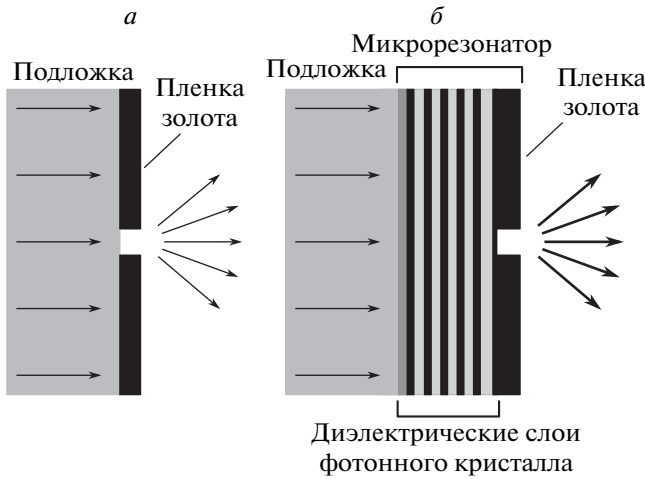
Явление прохождения волн (как электромагнитных, так и материальных волн де Бройля) через отверстия в экране всегда представляло большой интерес в различных областях физики. Первые эксперименты по прохождению света через отверстие заложили основы классической оптики и имеют бесчисленное количество практических применений. Прхождение материальных частиц через отверстие сыграло заметную роль в доказательстве волновой природы материальных частиц и впоследствии в создании атомной оптики [1] и атомной литографии [2]. В живых системах отверстия в клетке мембраны играют важную роль селективного фильтра [3].

Одной из определяющих характеристик прохождения частиц через отверстие является поток прошедших частиц. При размерах отверстий, меньших соответствующих длин волн, поток прошедших частиц (как фотонов, так и материальных частиц) мал, что делает их трудно применимыми и, соответственно, малоинтересными. Поэтому обнаружение явле-

ния экстремального пропускания света (ЭПС) [4] вызвало огромный интерес в научном сообществе. Последовавшие многочисленные фундаментальные исследования в этой области сделали субволновое отверстие новым оптическим элементом [5]. В настоящее время создан новый класс оптических элементов на основе эффекта ЭПС, включая светодиоды, селективные поляризационные фильтры, усилители энергии. Существует также предложение о возможности реализации экстремального пропускания волн материи [6].

При экстремальном пропускании света через наноотверстие отношение энергии, прошедшей через экран с отверстием, к энергии, падающей на отверстие, может превышать единицу и на несколько порядков превосходит значение, предсказываемое теорией дифракции Бете для субволновых отверстий [7–9]. Экстремально высокое прохождение излучения основано на множественных факторах, основным из которых является эффективное возбуждение поверхностных (плазмонных) колебаний [5]. Пропускание наноотверстий может быть усилено также при помощи конструктивной интерференции

\*E-mail: laser.isan@gmail.com



**Рис. 1.** а) Наноотверстие в золотой пленке, нанесенной на кварцевую подложку. б) Наноотверстие в золотой пленке, являющейся частью микрорезонатора, образованного на кварцевой подложке с помощью фотонного кристалла

волн, аналогично образованию резонансов типа Фабри–Перо [10, 11].

Эффект возникновения ЭПС (возбуждения плазмонных волн и Фабри–Перо резонансов) и его использование в случае отверстий ограничены рядом факторов: 1) необходимостью относительно больших размеров отверстий диаметром, немного меньшим диаметра, соответствующего длине волны отсечки распространяющейся моды волновода, образованного наноотверстием [12]; 2) требованием высокой проводимости материала экрана (в основном золото и серебро); 3) необходимостью наличия периодичности структур; 4) большой спектральной шириной резонанса прошедшего излучения.

Отдельной важной проблемой является значительное увеличение потока фотонов через единичное наноотверстие, поскольку единичное наноотверстие позволяет реализовать локализованный в пространстве источник волн (рис. 1а), имеющий широкое практическое применение. К настоящему времени наибольшее увеличение пропускания через единичное наноотверстие составило значение  $G = 125$  и было реализовано за счет возбуждения поверхностных плазмонов на концентрических углублениях, окружающих наноотверстие и расположенных периодически в радиальном направлении [13]. Среди других подходов следует упомянуть линзу Пендри (Pendry) [14], представляющую собой резонатор размером, существенно меньшим длины волны света. В

работе [15] было показано, что расположение такой линзы в области ближнего поля наноотверстия позволяет увеличить пропускание излучения через единичное отверстие примерно в 740 раз на частотах электромагнитного поля в диапазоне нескольких гигагерц. Однако реализация этого подхода в оптическом диапазоне имеет технические ограничения, связанные с необходимостью контроля размеров такой линзы с нанометровой точностью. В работе [16] впервые был предложен и реализован иной механизм ЭПС через единичные отверстия. Он основан на помещении наноотверстия в световое поле, локализованное в одномерном фотонном кристалле.

Фотонные кристаллы были впервые предложены более двух десятилетий назад для реализации сильной локализации света [17, 18]. Среди большого разнообразия микро- и нанорезонаторов резонаторы на основе фотонных кристаллов являются одними из наиболее многообещающих устройств для изучения квантовоэлектродинамических эффектов, так как их добротность может достигать величины  $10^6$ . Квантовомеханическая система, помещенная в фотонный кристалл, обладает иными физическими свойствами по сравнению с системой в свободном пространстве. В частности, может возникать увеличение скорости спонтанного излучения, возможна генерация второй гармоники и многие другие эффекты [17].

Известно, что прохождение света через наноотверстие можно с хорошей точностью моделировать, используя принцип Бабине, который сводится к замене наноотверстия нанодиском, характеризуемым соответствующими (магнитным и электрическим) дипольными моментами, как это было сделано впервые Бете в работе [7]. Также хорошо известно, что диполь, помещенный в резонатор, обладает иными радиационными свойствами по сравнению с диполем в свободном пространстве. Основная идея использованного в данной работе подхода является реализация условий, в которых наноотверстие (эффективный диполь) помещается в область максимального поля одномерного фотонного кристалла. При этом можно получить условия, при которых скорость переизлучения эффективного диполя возрастает и соответственно возрастет прошедшая световая мощность через наноотверстие.

В данной работе представлено детальное изучение эффекта ЭПС при помещении наноотверстия диаметром, существенно меньшим длины волны света, в поле микрорезонатора, образованного одномерным фотонным кристаллом и золотой пленкой.

## 2. УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

В настоящей работе используется микрорезонатор, созданный на основе одномерного фотонного кристалла. Фотонный кристалл образован двенадцатью чередующимися диэлектрическими слоями толщиной  $x_i = \lambda/4n_i$ , где  $\lambda$  — длина волны света ( $\lambda = 730$  нм),  $n_i$  — показатель преломления материала слоев. Диэлектрические слои расположены таким образом, что за слоем с высоким показателем преломления ( $\text{TiO}_2$ ,  $n_{\text{TiO}_2} = 2.23$  [19]) следует слой с низким показателем преломления ( $\text{MgF}_2$ ,  $n_{\text{MgF}_2} = 1.38$  [19]). Слои из диэлектрика образуют одномерный фотонный кристалл, реализующий малое (около 2 %) пропускание света в спектральном диапазоне от 650 нм до 800 нм (запрещенная зона фотонного кристалла). На диэлектрические слои нанесен слой золота (рис. 1б), это позволяет получить микрорезонатор с добротностью около 100.

Для расчета прохождения плоской световой волны через микрорезонатор использовался подход на основе характеристической матрицы. Изменение светового поля при прохождении через каждый слой диэлектрика определяется матрицей  $2 \times 2$ , а влияние всех слоев определяется произведением таких индивидуальных матриц — так называемой характеристической матрицей [20]:

$$M = M_1 M_2 \dots M_{12} M_{\text{Au}} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(kh_j) & [i \sin(kh_j)] / Y_j \\ i Y_j \sin(kh_j) & \cos(kh_j) \end{bmatrix}.$$

Матрица  $M_j$  связывает электрическую и магнитную компоненты светового поля на входе и выходе микрорезонатора:

$$\begin{bmatrix} E_{in} \\ H_{in} \end{bmatrix} = M_j \begin{bmatrix} E_{out} \\ H_{out} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число падающей волны,  $h_j = n_j x_j$  — оптическая толщина слоя,  $Y_j = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} n_j$ . Соответственно амплитудный коэффициент отражения  $r$  и амплитудный коэффициент пропускания  $t$  определяются выражениями

$$r = \frac{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}}, \quad (3)$$

$$t = \frac{2Y_0}{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}}. \quad (4)$$

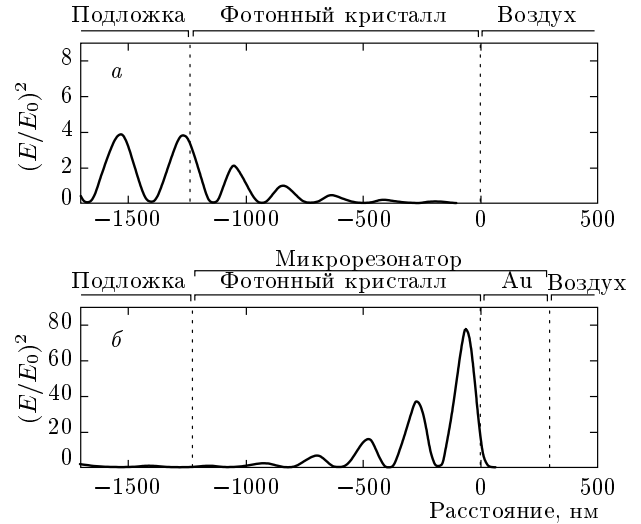
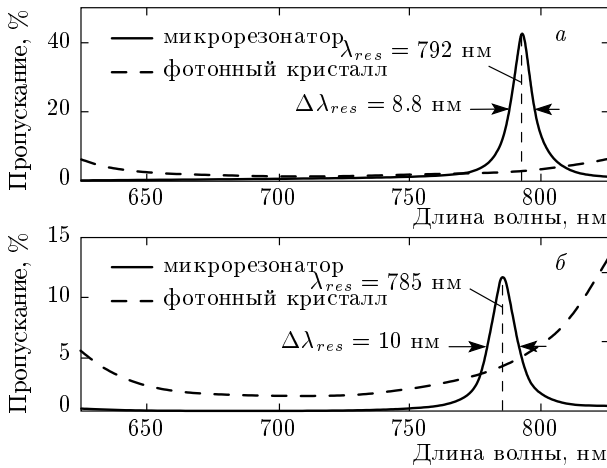


Рис. 2. Пространственные распределения электрического поля световой волны:  $a$  — в диэлектрических слоях фотонного кристалла,  $b$  — в микрорезонаторе, образованном диэлектрическими слоями фотонного кристалла и золотой пленкой

Было рассмотрено распространение плоской монохроматической волны внутри фотонного кристалла с волновым вектором, направленным ортогонально к плоскости диэлектрических слоев. Рассмотрены три случая: 1) фотонный кристалл без слоя золота, 2) фотонный кристалл с золотой пленкой толщиной 45 нм, 3) фотонный кристалл с золотой пленкой толщиной 220 нм. В первом случае, в фотонном кристалле без слоя золота мода микрорезонатора не формируется. Во втором и третьем случаях образуется микрорезонатор с узкополосной модой, локализованной внутри запрещенной зоны фотонного кристалла. Уменьшение толщины слоя золота в микрорезонаторе (второй случай) позволяет характеризовать его резонансную моду по пропусканию. Использование оптически толстого слоя золота (третий случай) необходимо для пространственной локализации резонансной моды резонатора, при этом его пропускание чрезвычайно мало из-за сильного ослабления в пленке золота.

На рис. 2а представлено рассчитанное с использованием характеристической матрицы распределение электрического поля  $E^2(r)$  на оси фотонного кристалла на резонансной частоте микрорезонатора  $\lambda_{res} = 789.6$  нм, нормированное на квадрат амплитуды поля падающей плоской волны  $E_0^2$ . Распределение электрического поля внутри микрорезонатора, образованного фотонным кристаллом и слоем золо-



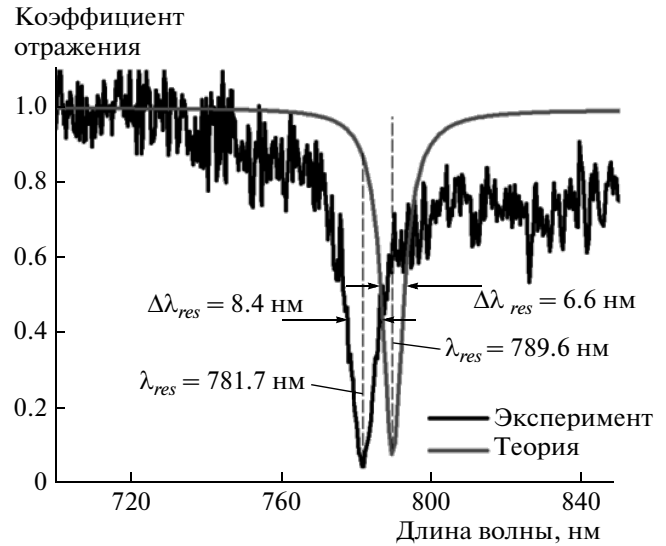
**Рис. 3.** Спектры пропускания фотонного кристалла и микрорезонатора, в котором золотая пленка имеет толщину 45 нм: *a* — результат расчета с использованием метода характеристических матриц, *b* — экспериментально измеренный спектр

та толщиной 220 нм, представлено на рис. 2б. Как видно из рис. 2а, в фотонном кристалле, образованном только диэлектрическими слоями, без использования слоя золота, плоская волна испытывает сильное отражение и поле в слое TiO<sub>2</sub>, граничащем с воздухом, мало и составляет около 0.02E<sub>0</sub><sup>2</sup>. Добавление в фотонный кристалл слоя из золота позволяет реализовать микрорезонатор (рис. 2), в котором поле в точке *x<sub>max</sub>* достигает максимального значения E<sub>max</sub><sup>2</sup> ≈ 80E<sub>0</sub><sup>2</sup> (в слое TiO<sub>2</sub>, прилегающем к золотой пленке), а на границе раздела TiO<sub>2</sub>/Au составляет приблизительно 14E<sub>0</sub><sup>2</sup>. Эффективная длина микрорезонатора чрезвычайно мала и составляет величину

$$L_{eff} = \frac{\int \varepsilon(x)|E(x)|^2 dx}{\varepsilon(x_{max})|E(x_{max})|^2} \approx 0.17\lambda,$$

где  $\varepsilon(x)$  — пространственная зависимость диэлектрической проницаемости микрорезонатора.

На рис. 3а представлены рассчитанные с помощью метода характеристической матрицы спектры пропускания микрорезонатора, образованного фотонным кристаллом и слоем золота толщиной 45 нм, а также спектр пропускания фотонного кристалла без нанесенного золотого слоя (штриховая линия). Узкий резонанс на длине волны  $\lambda_{res} = 792$  нм в спектре пропускания является прямым доказательством формирования микрорезонатора, так как без микрорезонатора пропускание составило бы значение менее 2% (рис. 3а). Ширина резонанса равна



**Рис. 4.** Спектры отражения микрорезонатора, в котором последний слой (Au) имеет толщину 220 нм (теория и эксперимент)

8.8 нм, что соответствует добротности микрорезонатора  $Q = \omega/\Delta\omega \approx 90$ .

Для микрорезонатора, образованного фотонным кристаллом и золотой пленкой толщиной 220 нм, исследование спектральных характеристик пропускания невозможно, так как слой золота толщиной 220 нм сильно ослабляет падающее на него излучение. На рис. 4 представлен рассчитанный с помощью характеристической матрицы спектр отражения такого микрорезонатора при освещении его плоской волной со стороны диэлектрических слоев. Резонанс в спектре отражения реализуется на длине волны  $\lambda_{res} = 789.6$  нм и имеет ширину 6.6 нм, что соответствует моде микрорезонатора с добротностью, приблизительно равной 120. Несмотря на умеренное значение добротности микрорезонатора, рассматриваемая конфигурация обладает важным для дальнейшего применения свойством: световое поле значительно усиливается вблизи поверхности золотой пленки.

Отметим некоторые важные особенности выбранной конфигурации микрорезонатора: слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $n_{Al_2O_3} = 1.63$ ), находящийся между кварцевой подложкой и слоем TiO<sub>2</sub>, уменьшает скачок показателя преломления в направлении распространения светового излучения и обеспечивает увеличение амплитуды поля резонансной моды микрорезонатора. Выбранная большая толщина золотой пленки позволяет сильно ослабить световое

поле, что необходимо для дальнейших исследований пропускания света через нанотверстия, изготовленные в такой золотой пленке.

В экспериментальной реализации микрорезонатора диэлектрические слои были нанесены на поверхность кварцевой подложки с помощью осаждения в условиях высокого вакуума с ионным ассистированием. Золотая пленка нанесена термическим распылением. Изготовление микрорезонатора осуществлялось в условиях чистого помещения класса 100. Толщина созданной золотой пленки и ее шероховатость измерялись с помощью атомно-силового микроскопа. Измеренные параметры шероховатости имеют следующие величины: амплитуда (среднеквадратичное отклонение) — около 3 нм, продольная шероховатость (длина корреляции) — около 30 нм.

Измеренный спектр пропускания микрорезонатора с частично пропускающим свет слоем золота (толщиной 45 нм) представлен на рис. 3б. На этом же рисунке штриховой линией показан измеренный спектр пропускания фотонного кристалла без золотого слоя. Измеренный спектр отражения микрорезонатора с толстым слоем золота (толщиной 220 нм) представлен на рис. 4. Из рисунков видно, что в области запрещенной зоны пропускания фотонного кристалла при нанесении на него пленки золота образуется резонанс, свидетельствующий о формировании микрорезонатора. Измеренная резонансная частота микрорезонатора с оптически толстым слоем золота равна  $\lambda_{res} = 781.7$  нм, а ширина резонанса на полувысоте составляет величину  $\Delta\lambda_{res} = 8.4$  нм. Добротность такого микрорезонатора равна 93.

### 3. СОЗДАНИЕ НАНОТВЕРСТИЙ В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

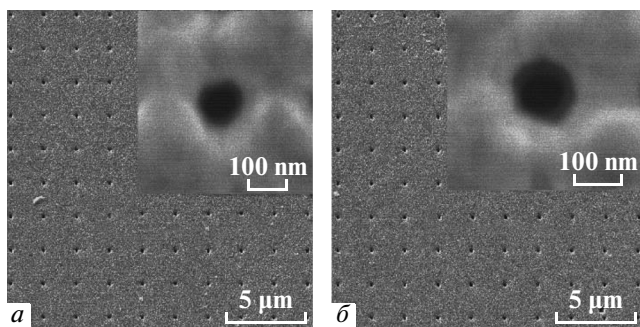
Для изготовления нанотверстий в золотом слое микрорезонатора использовался остросфокусированный ионный пучок. Установка с ионным пучком (FEI Quanta 3D) имеет следующие параметры: используемые ионы —  $\text{Ga}^+$ , ускоряющее напряжение 30 кэВ, диаметр пучка на поверхности около 10 нм. С таким ионным пучком были изготовлены нанотверстия диаметром менее 100 нм. Микроскопия нанотверстий проводилась с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-7001F с пространственным разрешением около 5 нм. Для уменьшения влияния эффекта осаждения углерода на поверхность золотой пленки, индуцированного остросфокусированным пучком электронов, микро-

скопия нанотверстий проводилась при достаточно умеренном значении ускоряющего напряжения, равном 5 кэВ.

Особое внимание было уделено задаче создания нанотверстия в пленке золота микрорезонатора. В упрощенном рассмотрении формирование нанотверстия происходит за счет выбивания одного атома золота одним ионом ионного пучка. При избыточно больших временах экспозиции поверхности золота ионным пучком происходит не только формирование нанотверстия в золотой пленке, но и разрушение прилегающего к золотой пленке диэлектрического слоя микрорезонатора. Это приводит к существенному ухудшению характеристик моды микрорезонатора. С другой стороны, при малых временах экспозиции в золотой пленке не образуется сквозного отверстия, что препятствует проникновению в нанотверстие светового поля, локализованного в микрорезонаторе.

Оптимальное время воздействия ионного пучка (доза пучка) определялось в отдельном эксперименте по изготовлению нанотверстий в золотой пленке, осажденной на ультратонкой пленке  $\text{SiO}_2$  толщиной 40 нм [21]. Использование такой пленки позволяло, во-первых, контролировать поток ионов, прошедших через нанотверстие [22], и, во-вторых, проводить электронную микроскопию отверстия с обеих сторон пленки. Контраст изображения в электронном микроскопе чувствителен к материалу исследуемого объекта, что позволяет идентифицировать границу раздела  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  внутри нанотверстия, а также определять степень разрушения пленки  $\text{SiO}_2$ .

Слой золота на ультратонкой пленке  $\text{SiO}_2$  создавался одновременно с напылением золота на одномерный фотонный кристалл при изготовлении микрорезонатора, что гарантировало одинаковое значение толщины золотого слоя как в микрорезонаторе, так и на поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ . После серии экспериментов была определена оптимальная доза пучка, которая равна 4 пКл при токе сфокусированного ионного пучка 10 пА. Такие параметры ионного пучка позволяют создавать в пленке золота отверстие диаметром около 60 нм, стенки отверстия почти вертикальны (отклонение от вертикали около  $5^\circ$ ). В материале пленки  $\text{SiO}_2$  отверстие не является сквозным, из чего делается заключение, что разрушение пленки  $\text{SiO}_2$  в направлении оси отверстия составляет значение менее 40 нм. В работе [23] было показано, что при одинаковых параметрах ионного пучка скорость травления пленки из материала  $\text{TiO}_2$  примерно в два раза меньше, чем пленки из  $\text{SiO}_2$ . Основываясь на этих данных, мы оценива-



**Рис. 5.** Изображения в электронном микроскопе нанотверстий, изготовленных в золотом слое микрорезонатора с помощью острогофокусированного ионного пучка: *а* — отверстия диаметром 60 нм, полученные при использовании дозы ионного пучка 4 пК, *б* — отверстия диаметром 72 нм, полученные при использовании дозы ионного пучка 5 пК. Толщина золотого слоя 220 нм. На вставках показаны изображения единичных нанотверстий

ем значение глубины разрушения слоя  $\text{TiO}_2$  вблизи нанотверстия микрорезонатора: не более 20 нм.

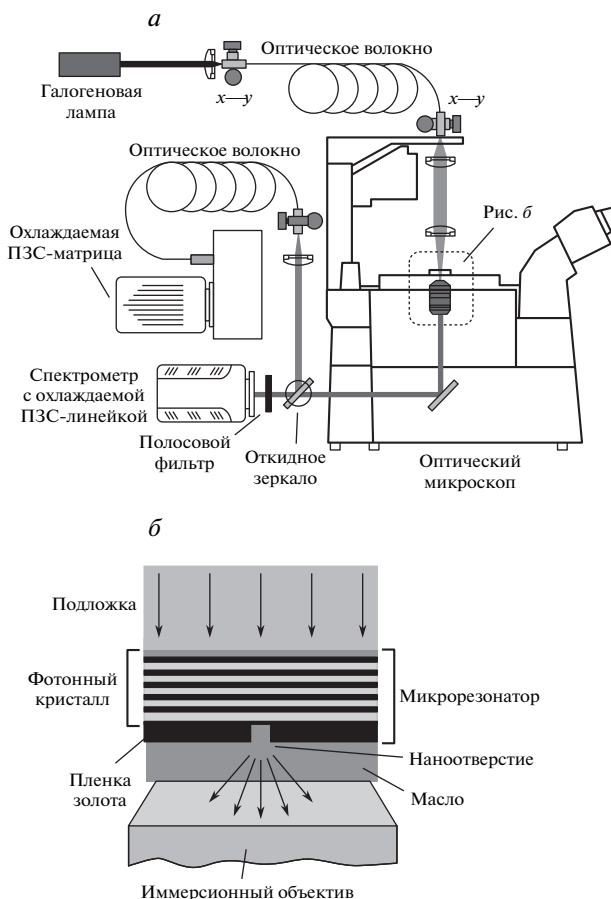
Мы изготовили два образца для исследований влияния микрорезонатора на оптические свойства нанотверстия: нанотверстия в слое золота микрорезонатора (рис. 1*б*) и нанотверстия в реперной золотой пленке, осажденной на подложке  $\text{SiO}_2$  толщиной 2 мкм (рис. 1*а*). Толщина реперной золотой пленки была идентична толщине золотого слоя в микрорезонаторе. В каждом образце были созданы матрицы  $10 \times 10$  одинаковых нанотверстий ионным пучком с параметрами, определенными выше. Расстояние между нанотверстиями равно 2 мкм (рис. 5*а*). На вставке рис. 5*а* показано изображение одного из отверстий матрицы, полученное с использованием электронной микроскопии. Анализ изображений показал, что существует незначительный разброс значений размера и геометрии созданных нанотверстий: (*а*) около 60% отверстий имеет круглую форму и диаметр  $58 \pm 5$  нм, (*б*) часть отверстий имеет эллиптичность с максимальным значением разброса осей эллипса  $2a = 54$  нм,  $2b = 63$  нм. Разброс размеров и геометрии нанотверстий связан с поверхностной неоднородностью золотой пленки, изготовленной методом термического испарения на поверхность диэлектрика. При таком способе создания пленки происходит образование в золотой пленке наноразмерных кристаллов из-за высокой поверхностной энергии атомов золота [24].

С целью изучения влияния диаметра нанотверстия на его пропускание в обоих образцах были изго-

товлены также нанотверстия с большей дозой ионного пучка, равной 5 пКл при токе 10 пА. При таких параметрах ионного пучка нанотверстия имеют диаметр  $72 \pm 5$  нм (рис. 5*б*). Для таких нанотверстий оценка глубины разрушения слоя  $\text{TiO}_2$ , прилегающего к слою золота, составляет около 25 нм.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА ЕДИНИЧНЫМ НАНОТВЕРСТИЕМ

Измерения пропускания света нанотверстием, изготовленным в золотой пленке, проводились с использованием оптического микроскопа на экспериментальной установке, представленной на рис. 6. Оба образца облучались световым пучком галогеновой лампы (с расходимостью пучка приблизительно



**Рис. 6.** Схема экспериментальной установки: *а* — общая схема, *б* — схема размещения в микроскопе микрорезонатора с нанотверстием

3°) под нормальным углом к образцу. Для получения однородного освещения образца излучение галогеновой лампы пропускалось через многомодовое оптическое волокно. Для исследования роли коллективных эффектов в пропускании света через единичное нанодоверствие проводились также измерения, при которых излучение галогеновой лампы пропускалось через одномодовое волокно и далее фокусировалось с помощью объектива  $10\times$  ( $NA = 0.3$ ) в пятно диаметром около 2 мкм (ширина на полувысоте) в плоскости нанодоверствия, освещая единичное нанодоверствие. Специальные меры были предприняты для контроля интенсивности падающего света. Для этого в обоих образцах часть поверхности была свободна от оптических покрытий. Прошедший через нанодоверствия свет собирался с помощью иммерсионного объектива Nikon с увеличением  $100\times$  ( $NA = 1.49$ ).

Исследовались спектральные характеристики пропускания нанодоверстий. Для этого прошедший через нанодоверствия свет регистрировался двумя способами: 1) с помощью набора полосовых фильтров (с последующей регистрацией охлаждаемой ПЗС-матрицей с лавинным усилением сигнала — Princeton Instruments), 2) с помощью монохроматора (с высокой светосилой, со встроенной охлаждаемой ПЗС-линейкой — Princeton Instruments). Для обоих образцов на границе раздела золото/воздух использовалось иммерсионное масло ( $n = 1.515$ ) для того, чтобы эффективность сбора фотонов, выходящих из нанодоверствия, была максимальна.

Экспериментальная установка позволяла получать двумерное оптическое изображение единичного нанодоверствия с пространственным разрешением около 300 нм. Спектр пропускания единичного отверстия определялся двумя способами. В первом способе измерялось пропускание матрицы с нанодоверствиями с помощью спектрометра и затем проводилась нормировка полученного спектра на число нанодоверстий. Такой способ позволял получать спектры с разрешением около 0.7 нм. Во втором способе измерялся сигнал изображения единичного нанодоверствия на ПЗС-матрице на разных длинах волн пропускания полосовых фильтров, установленных перед ПЗС-матрицей, что позволяло получать спектры пропускания с разрешением около 10 нм.

Пропускание нанодоверствия определялось как

$$T(\lambda) = \frac{Q_{Em}(\lambda)}{gI(\lambda)S},$$

где  $Q_{Em}(\lambda)$  — полный поток фотонов, прошедших

через нанодоверствие,  $g$  — эффективность сбора объектива,  $I(\lambda)$  — интенсивность падающего света,  $S$  — площадь нанодоверствия. Для определения параметра  $g$  необходимо знать диаграмму распределения света, испускаемого нанодоверствием. В исследуемой конфигурации длина канала, образованного отверстием в золотой пленке, в 3.6 раз больше диаметра отверстия и свет, испускаемый нанодоверствием, распространяется неоднородно в пространстве: расчеты показывают, что излучение в основном сосредоточено в конусе с углом  $150^\circ$  [25]. Угол сбора фотонов для объектива с  $NA = 1.49$  примерно равен  $160^\circ$ , что позволяло принять  $g \approx 1$ .

Во избежание погрешностей, связанных с различием спектральной чувствительности различных фотодетекторов и спектрального пропускания различных оптических приборов,  $I(\lambda)$  измерялась в микроскопе с использованием того же объектива и при помощи той же ПЗС-камеры, что и  $Q_{Em}(\lambda)$ . Отметим, что плотность потока фотонов, прошедших через нанодоверствие, на несколько порядков превышала плотность потока фотонов, прошедших через золотую пленку. Это позволяло в эксперименте детектировать фотоны, прошедшие через нанодоверствие, практически на нулевом фоне.

## 5. ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА НАНОДОВЕРСТИЕМ В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Регистрация пропускания света нанодоверствием в микрорезонаторе фотонного кристалла проводи-

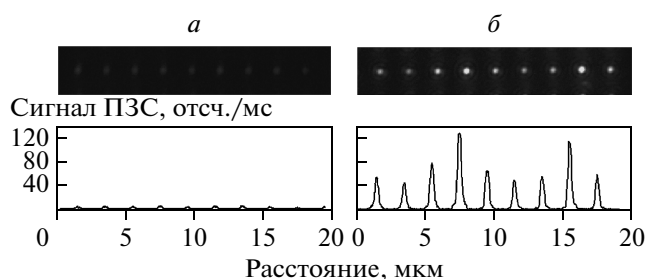
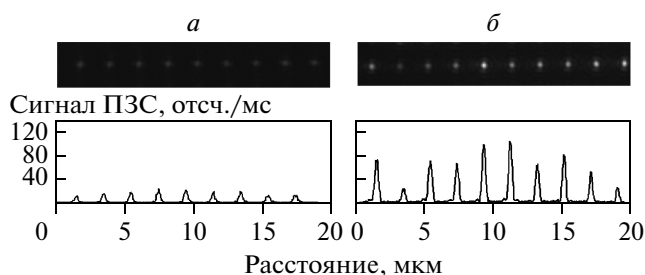


Рис. 7. Изображения нанодоверстий диаметром 60 нм в оптическом микроскопе при освещении их белым светом через полосовой фильтр с центром полосы пропускания на длине волны 780 нм и шириной 10 нм. Двумерные изображения и их поперечные профили для нанодоверстий а) в реперной золотой пленке, б) в золотой пленке микрорезонатора



**Рис. 8.** Изображения нанотверстий диаметром 72 нм в оптическом микроскопе при освещении белым светом через полосовой фильтр с центральной полосой пропускания на длине волны 780 нм и шириной 10 нм. Двумерные изображения и их поперечные профили для нанотверстий *a)* в реперной золотой пленке, *б)* в золотой пленке микрорезонатора

лась с помощью оптического микроскопа (рис. 6). На рис. 7, 8 представлены изображения нанотверстий в реперной золотой пленке и нанотверстий в золотой пленке микрорезонатора на длине волны света вблизи резонансной моды микрорезонатора для двух размеров нанотверстий: диаметром 60 нм и 72 нм.

Изображения получены при одинаковых параметрах освещения и зондирования обоих образцов на длине волны  $\lambda_c = 780$  нм. Для этого перед ПЗС-матрицей был установлен полосовой фильтр с центральной длиной волны пропускания  $\lambda_c = 780$  нм и шириной полосы  $\Delta\lambda = 10$  нм. На двумерных изображениях нанотверстий видно, что амплитуда сигнала изображения нанотверстий реперной золотой пленки (рис. 7*a*, 8*a*) чрезвычайно мала. При этом амплитуда сигнала изображения нанотверстий микрорезонатора (рис. 7*б*, 8*б*) чрезвычайно велика и превышает динамический диапазон отображения сигнала. Это означает, что при одинаковых параметрах падающего излучения прошедший поток света через нанотверстия, изготовленные в микрорезонаторе, существенно выше, чем через нанотверстия в реперной золотой пленке. Этот факт является прямым доказательством влияния микрорезонатора на увеличение пропускания нанотверстий.

На рис. 7, 8 видно, что пропускание нанотверстий, изготовленных как в микрорезонаторе, так и в реперной золотой пленке, изменяется от отверстия к отверстию. Для некоторых отверстий эти различия достигают 100%. Столь сильная вариация в интен-

сивности прошедшего света не может быть объяснена только известным фактом зависимости пропускающей способности нанотверстий от их формы, диаметров и геометрии [26].

Используя изображения нанотверстий, полученные в электронном микроскопе, мы смогли установить однозначное соответствие мощности излучения, прошедшего через каждое индивидуальное нанотверстие (рис. 7, 8), их размеру и геометрии. Оказалось, что для отверстий круглой формы и диаметром 60 нм (рис. 7) амплитуда сигнала через нанотверстие в реперной пленке равна 3.5 относительных единиц, а для нанотверстий в микрорезонаторе соответствующее значение равно 65. Центр полосы пропускания полосового фильтра смещен от резонанса микрорезонатора. Учет этого фактора дает поправочный коэффициент к отношению прошедших мощностей 1.53. Окончательно получаем, что поток фотонов через нанотверстие, встроенное в микрорезонатор, примерно в 28 раз превышает соответствующее значение для нанотверстий в реперной золотой пленке на длине волны резонанса микрорезонатора.

Из представленных данных видно, что пропускание нанотверстий различных диаметров в микрорезонаторе на длине волны резонанса микрорезонатора примерно одинаковы (рис. 7, 8). При этом амплитуды сигнала пропускания нанотверстий различных диаметров, изготовленных в реперной золотой пленке, различаются примерно в два раза, что находится в хорошем соответствии с теорией пропускания Бете, согласно которой пропускание единичного отверстия диаметром, существенно меньшим длины волны света, пропорционально  $(d/\lambda)^4$ , где  $d$  — диаметр нанотверстия. Измерения показали, что для отверстий диаметром 72 нм поток фотонов, переизлучаемых единичным отверстием, встроенным в микрорезонатор, примерно в 15 раз превышает поток фотонов через аналогичное отверстие, изготовленное в золотой пленке, и это значение примерно в два раза меньше, чем для нанотверстий диаметром 60 нм.

Проведенные измерения пропускания отверстий диаметром 60 нм и 72 нм в реперной золотой пленке показывают, что увеличение пропускания нанотверстия при увеличении его диаметра хорошо согласуется с теорией Бете. Для нанотверстий в золотом слое микрорезонатора увеличение пропускания объясняется увеличением светового поля в микрорезонаторе в месте расположения нанотверстия. В



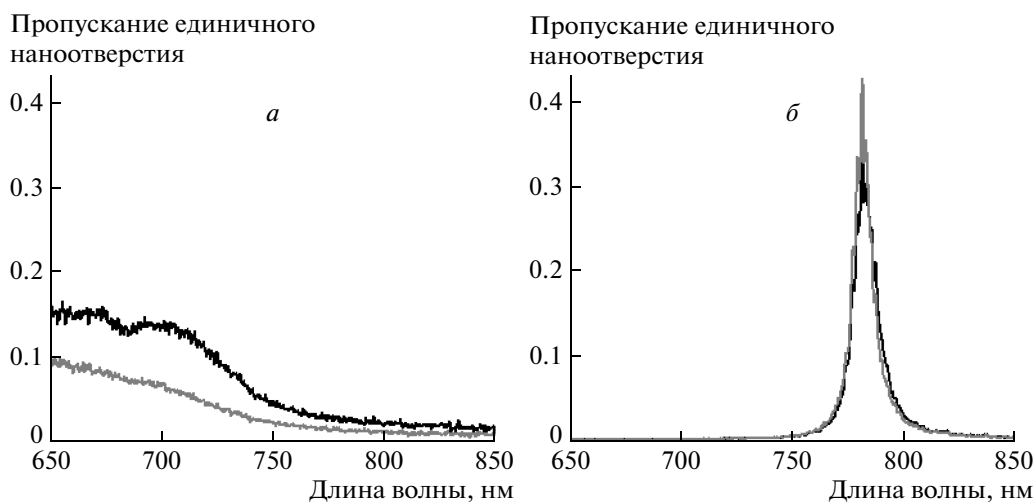


Рис. 9. Спектры пропускания нанотверстий различных диаметров *a*) в реперной золотой пленке, *б*) в золотой пленке микрорезонатора. Нанотверстия диаметром 60 нм (серые кривые), 72 нм (черные)

то же время нанотверстия могут влиять на свойства микрорезонатора и корректное рассмотрение предполагает исследовать микрорезонатор и нанотверстие как единую систему, в которой пропускание нанотверстия больше не удовлетворяет теории Бете и определяется следующими основными процессами: 1) усилением светового поля в микрорезонаторе, 2) прохождением света через нанотверстие, 3) изменением характеристик резонансной моды микрорезонатора из-за наличия нанотверстия, 4) влиянием микрорезонатора на прохождение света через нанотверстие.

В отдельном эксперименте мы исследовали эффект коллективного влияния нанотверстий на их пропускание. Для этого использовались два режима освещения отверстий излучением (на длине волны резонансной моды микрорезонатора): 1) освещение всех  $10 \times 10$  нанотверстий микрорезонатора и реперной золотой пленки, 2) освещение единичного нанотверстия жестко сфокусированным излучением. Измеренные значения пропускания единичного круглого нанотверстия диаметром 60 нм составили  $T_1 \approx 1.5\%$  в реперной золотой пленке и  $T_2 \approx 41\%$  в микрорезонаторе. Измеренные значения не зависели от выбранной схемы освещения нанотверстия. Таким образом, мы не обнаружили эффектов коллективного влияния нанотверстий на их пропускание и, следовательно, суммарное пропускание матрицы с нанотверстиями эквивалентно суммарному пропусканию такого же количества изолированных нанотверстий.

## 6. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА ЕДИНИЧНЫМ НАНОТВЕРСТИЕМ

Характерным отличием спектра пропускания нанотверстия в микрорезонаторе от спектра пропускания нанотверстия в реперной пленке золота является его острая частотная селективность. На рис. 9*a* показаны спектры пропускания единичных нанотверстий диаметром 60 нм и 72 нм в реперной золотой пленке и изготовленных в золотой пленке микрорезонатора. В спектрах пропускания нанотверстий микрорезонатора отчетливо виден резонанс на длине волны моды микрорезонатора. Ширина резонанса равна 9 нм для обоих нанотверстий и соответствует спектральной ширине моды микрорезонатора. На длинах волн вне резонанса пропускание нанотверстия в микрорезонаторе определяется пропусканием диэлектрических слоев фотонного кристалла (запрещенная зона фотонного кристалла) и значительно меньше, чем пропускание нанотверстий в реперной золотой пленке. Минимальное значение пропускания нанотверстия (диаметром 60 нм) в микрорезонаторе достигается на длине волны света 675 нм и равно  $1.1 \cdot 10^{-3}$ , что почти в 300 раз меньше пропускания этого отверстия на резонансной частоте. Таким образом, использование микрорезонатора позволяет реализовать высокую спектральную селективность пропускания единичного нанотверстия.

Как известно, локализованные и распространяющиеся поверхностные плазмонные волны могут

сильно изменить пропускание света нанодоверстием, изготовленным в металлических пленках, усиливая или ослабляя прошедшее через нанодоверстие излучение. В нашем случае пропускание нанодоверстий в золотой пленке микрорезонатора сравнивалось с пропусканием таких же нанодоверстий в золотой пленке, созданной на подложке из кварца. Плазмонные волны возбуждаются как в реперной золотой пленке, так и в золотой пленке микрорезонатора, и если существует дополнительный вклад плазмонных волн в пропускание света в нанодоверстиях, то он должен быть одинаков в обоих случаях. Кроме того, два экспериментальных фактора подтверждают, что измеренное увеличение пропускания нанодоверстия может быть отнесено только к влиянию резонансной моды микрорезонатора. Первый — это отсутствие резонансов плазмонных волн в измеренных спектрах пропускания нанодоверстий в реперной золотой пленке (рис. 9а), второй — узкий резонанс в пропускании нанодоверстия в микрорезонаторе с шириной, значительно меньшей характерных значений ширины резонансов плазмонных волн в спектре пропускания периодически расположенных нанодоверстий. Возможность же возбуждения плазмонных волн в золотой пленке микрорезонатора является дополнительной возможностью увеличения пропускания нанодоверстий в рассматриваемом подходе.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрирована возможность управления пропусканием света нанодоверстием в микрорезонаторе. Показано, что нанодоверстие в микрорезонаторе позволяет реализовать, во-первых, резонансное увеличение пропускания на длине волны резонанса микрорезонатора и, во-вторых, подавление пропускания на длинах волн запрещенной зоны фотонного кристалла. К числу основных практических применений реализованного подхода к увеличению пропускания света нанодоверстием можно отнести нанолитографию с использованием световых нанополей [27], квантовую информатику [28], сенсористику, хранение информации [29], генерацию второй и третьей гармоник излучения [13], наноразмерную оптическую микроскопию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-02-00804-а, 09-02-01022-а), Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля». Работа была выполнена

с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИСАН, Центра коллективного пользования МФТИ и НОЦ «Нанотехнологии» МФТИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. C. E. Wieman, D. J. Wineland, and D. E. Pritchard, *Rev. Mod. Phys.* **71**, S253 (1999).
2. В. И. Балыкин, *УФН* **179**, 297 (2009).
3. B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis et al., *Molecular Biology of the Cell*, Garland Sci., New York (2002).
4. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, *Nature* **391**, 667 (1998).
5. F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, T. W. Ebbesen, and L. Kuipers, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 729 (2010).
6. E. Moreno, A. I. Fernandez-Dominguez, J. I. Cirac, F. J. Garcia-Vidal, and L. Martin-Moreno, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 170406 (2005).
7. H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **66**, 163 (1944).
8. C. J. Bouwkamp, *Diffraction Theory*, Phys. Soc., London (1954).
9. F. J. Garcia de Abajo, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 1267 (2007).
10. A. Krishnan, T. Thio, T. J. Kim et al., *Opt. Comm.* **200**, 1 (2001).
11. F. Kalkum, M. Peter, G. Barbastathis, and K. Buse, *Appl. Phys. B* **100**, 169 (2010).
12. E. Popov and N. Bonod, in *Structured Surfaces as Optical Metamaterials*, ed. by A. A. Maradudin, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2011), p. 1.
13. A. Nahata, R. A. Linke, T. Ishi, and K. Ohashi, *Opt. Lett.* **28**, 423 (2003).
14. J. B. Pendry et al., *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47**, 2075 (1999).
15. K. Aydin, A. Cakmak, L. Sahin, Z. Li, F. Bilotti, L. Vegni, and E. Ozbay, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 013904 (2009).
16. P. N. Melentiev, A. E. Afanasiev, A. A. Kuzin et al., *Opt. Express* **19**, 22743 (2011).
17. E. Yablonovich, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987).
18. S. John, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987).

19. И. Я. Бубис, В. А. Вейденбах, И. И. Духопел и др., *Справочник технолога — оптика*, под ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова, Машиностроение, Ленингр. отделение, Ленинград (1983).
20. М. Борн, Э. Вольф, *Основы оптики*, Наука, Москва (1973).
21. P. N. Melentiev, A. V. Zablotskiy, D. A. Lapshin et al., *Nanotechnology* **20**, 235301 (2009).
22. D. P. Adams, M. J. Vasile, V. Hodges, and N. Patterson, *Microsc. Microanal.* **13**, 1512 (2007).
23. D. R. Baer, M. H. Engelhard, A. S. Lea et al., *J. Vacuum Sci. Technol. A* **28**, 1060 (2010).
24. D. W. Pashley, M. J. Stowell, M. H. Jacobs, and T. J. Law, *Phil. Magazine* **10**, 127 (1964).
25. Дж. Джексон, *Классическая электродинамика*, Мир, Москва (1965).
26. K. J. Klein Koerkamp, S. Enoch, F. B. Segerink et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 183901 (2004).
27. V. I. Balykin, V. V. Klimov, and V. S. Letokhov, in *Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology*, ed. by M. Rieth, W. Schommers, Elsevier, Amsterdam (2006), p. 1.
28. E. Altewischer, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, *Nature* **418**, 304 (2002).
29. J. Vučković, M. Loncar, and A. Scherer, *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 1131 (2000).