

УДК 621.383

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ФОТОНИКИ: ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

А. В. ШУЛЬГА, А. В. ХОМЧЕНКО
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Фотоника, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами преобразования оптических сигналов и созданием на их основе устройств различного назначения, выступает аналогом электроники, использующим вместо электронов кванты электромагнитного поля. Работа фотонных устройств базируется на таких оптических явлениях, как пропускание, модуляция, отражение, преломление, усиление, регистрация и волноводное распространение света [1]. Задача фотоники, в отличие от оптики, изучающей природу света, закономерности его распространения и взаимодействия с веществом, состоит в создании материалов с уникальными оптическими свойствами, управлении распространением, преломлением и отражением света, его локализации, перераспределении, частотной и фазовой перестройки.

Явления туннелирования световых волн через фотонные барьеры [2], внутрирезонаторного усиления и поглощения [3] света лежат в основе методов внутрирезонаторной волноводной спектроскопии. Оптическое туннелирование представляет собой нарушение закона полного внутреннего отражения света от границы раздела двух сред и его проникновение в среду, которая расположена на расстоянии меньше длины волны от той поверхности, где происходит отражение света. В таком случае фотон либо претерпевает полное внутреннее отражение, либо проникает (туннелирует) в другую среду через фотонный барьер – узкую область с меньшим показателем преломления. Если среда, в которую туннелирует свет, обладает волноводными свойствами, т. е. сама работает на основе полного внутреннего отражения и представляет собой планарный диэлектрический волновод, то туннелирование света будет происходить только при определённых углах падения света к границе среды и фотонного барьера. Это объясняется тем, что должно выполняться условие синхронизма составляющей фазовой скорости отражённого света на границу раздела сред и фазовой скорости распространения волноводной моды. Это приводит к тому, что вышеописанная оптическая структура демонстрирует частотно-угловую селективность по отношению к оптическому излучению, что используется в методах волноводной спектроскопии не только для возбуждения волноводов, исследования их свойств, создания датчиков, но также и в качестве активных элементов управления излучением.

Явление внутрирезонаторного усиления, лежащее в основе работы всех лазерных устройств, заключается в том, что фотоны, проходя через среду с инверсией заселённости энергетических уровней, могут индуцировать испускание идентичных себе фотонов. При условии преобладания вероятности индуцированного испускания над поглощением наблюдается усиление света. Помещение активной среды в оптический резонатор, состоящий, как правило, из сферических зеркал, обеспечивает фотонам направление распространения, в котором свет проходит через активную среду благодаря переотражениям на зеркалах максимальное количество раз. Наличие резонатора повышает не только вероятность увеличения количества фотонов, но и их поглощения. При постоянном коэффициенте усиления активной среды внесение в него даже сравнительно небольших оптических потерь приводит к более заметному изменению интенсивности внутрирезонаторного излучения по сравнению со случаем, когда излучение однократно проходит через поглощающую среду [4], и, таким образом, чем меньше коэффициент усиления резонатора лазера, тем больше величина регистрируемого внутрирезонаторного изменения интенсивности излучения при внесении потерь. Такая особенность наделяет внутрирезонаторные методы неоспоримым преимуществом по сравнению с классическими методами регистрации оптических потерь.

Для возбуждения волноводной моды заданного порядка в планарном диэлектрическом волноводе необходимо использовать устройство, обеспечивающее проникновение света под такими углами, при которых свет не только будет претерпевать многократное полное внутреннее отражение, но также обеспечит синфазность локализованным в волноводе фотонам. С подобной задачей хорошо справляется призмное устройство связи, состоящее из прозрачной равнобедренной призмы, к основанию которой через фотонный барьер прижат планарный волновод, и закреплённое на поворотном столике. Поворотом призмы вокруг оси устанавливаются углы падения луча на основание призмы, при которых происходит туннелированное излучения в волноводную моду.

Для внутрирезонаторной регистрации волноводных потерь необходимо призмное устройство связи, которое при внесении его в резонатор лазера превращало бы планарный волновод в источник внутрирезонаторных потерь с минимальными потерями и в то же время поддерживало юстировку лазера при изменении угла падения света. Призмное устройство связи, удовлетворяющее данным требованиям, а также оптическая схема установки для регистрации коэффициента отражения внутрирезонаторного излучения как функции углового положения призмы связи представлены на рис. 1 [5]. Для сохранения углового положения внутрирезонаторного излучения при сканировании выходное зеркало помещалось на подвижную платформу, которая автоматически перемещалась до восстановления

начального углового положения излучения, что контролировалось сегментным фотодиодом.

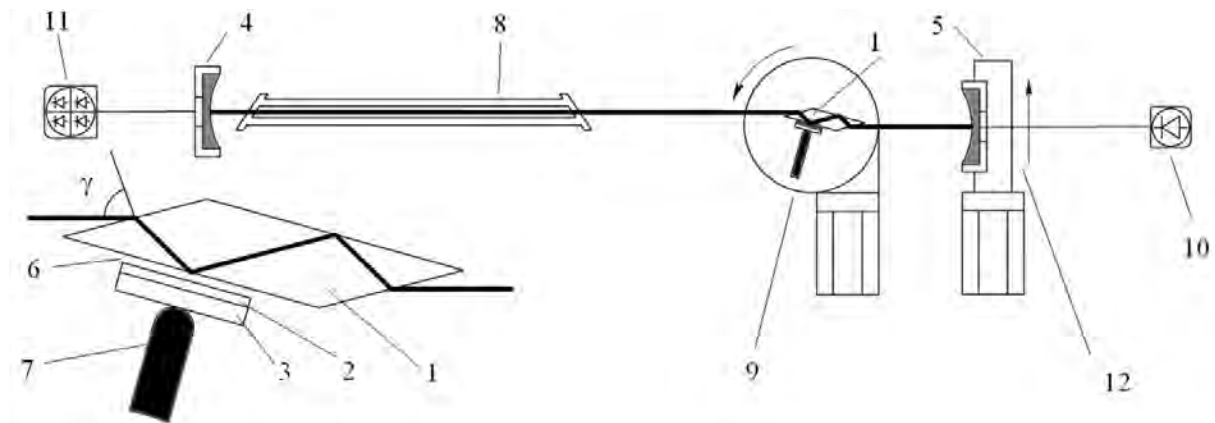


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – брестерская призма связи; 2 – волновод; 3 – подложка; 4 – «квазиглухое» зеркало; 5 – выходное зеркало; 6 – фотонный барьер; 7 – прижимной винт; 8 – газоразрядная трубка лазера; 9 – поворотная платформа; 10 – фотодиод; 11 – сегментный фотодиод

На рис. 2 приведён спектр отражения излучения от брестерской призмы связи с планарным пятимодовым волноводом с мнимой частью постоянной распространения порядка $\sim 10^{-5}$. Для пояснения преимущества метода следует отметить, что регистрация спектров велась при слабой связи призмы с волноводом, когда обычные способы не позволяли регистрировать подобное распределение.

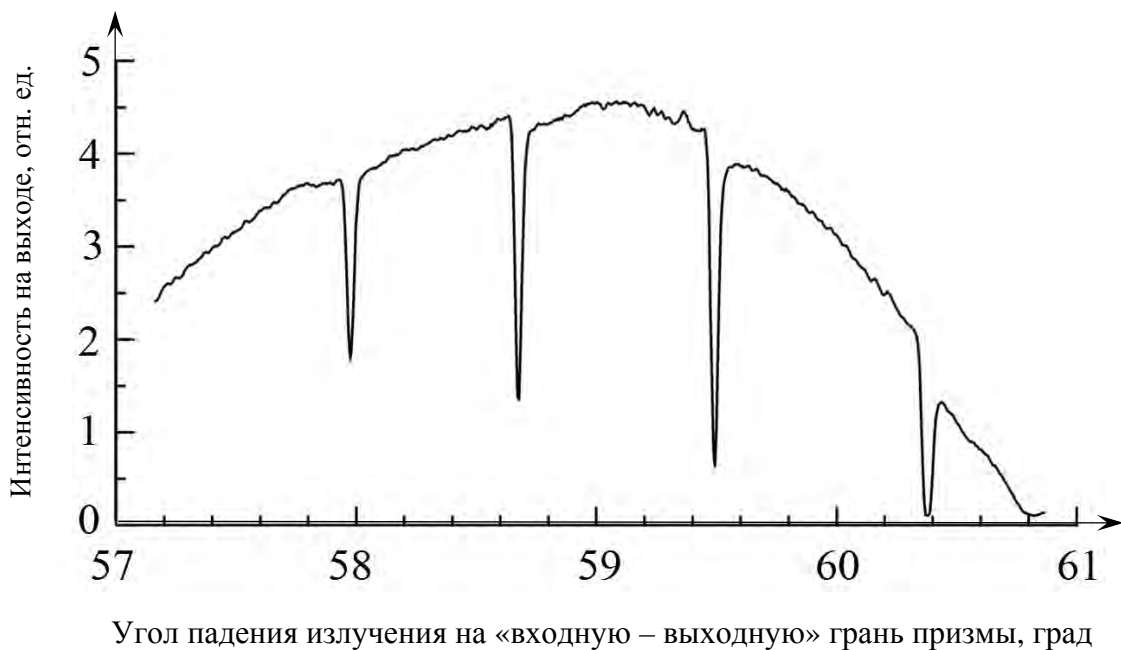


Рис. 2. Зависимость интенсивности внутрирезонаторного излучения от углового положения призмы связи

Применение полупроводниковых лазеров с внешним резонатором [6] также позволяет наблюдать спектры внутрирезонаторного отражения от основания призмы связи. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. В отличие от одночастотных лазеров, применение полупроводникового лазера даёт возможность внутрирезонаторной перестройки излучения и, таким образом, позволяет осуществлять сканирование не только по угловым координатам, но и по частоте. Результаты исследования обнаружили особенность влияния волноводных потерь на спектральный состав внутрирезонаторного излучения, заключающуюся в том, что настройка призмы связи на возбуждение волноводной моды приводит не к поглощению излучения, а к его спектральному перераспределению вследствие конкуренции мод.

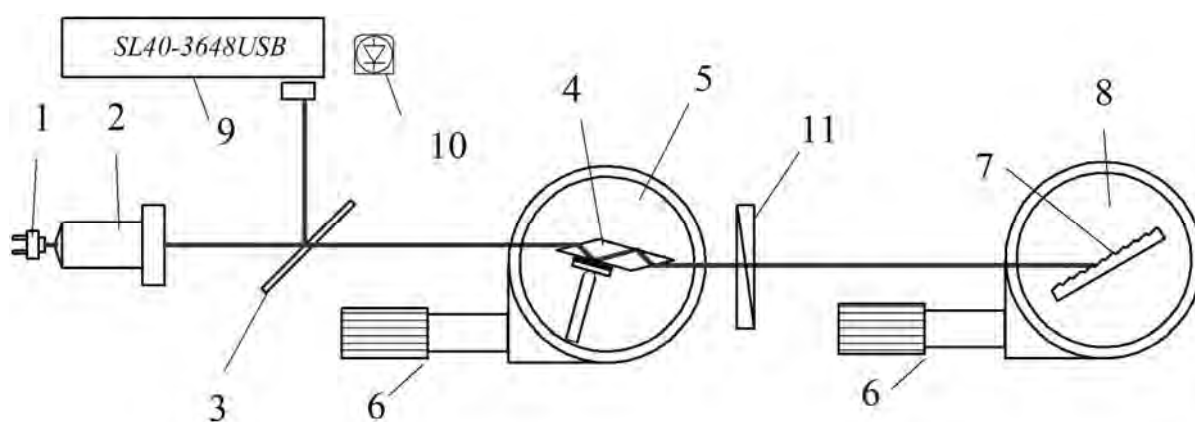
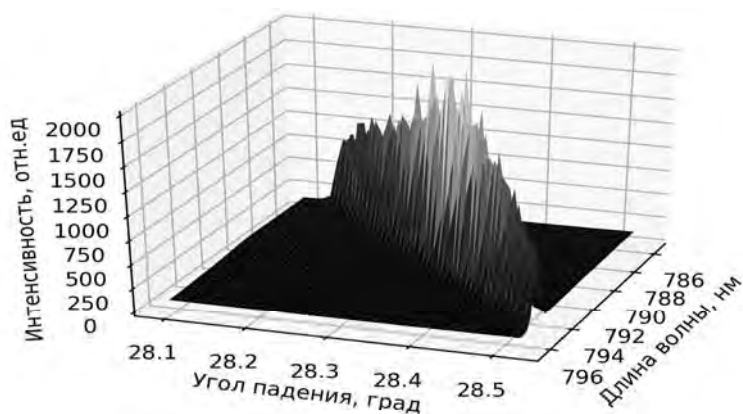


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазерный диод; 2 – микрообъектив; 3 – делительная пластинка; 4 – брюстеровское призмное устройство связи; 5, 8 – поворотный столик; 6 – микрометрический винт; 9 – спектрофотометр; 10 – фотоприемник; 11 – поляризатор

На рис. 4, а представлены результаты спектрального сканирования внутрирезонаторным излучением призмы связи без волновода, а на рис. 4, б – результаты такого же сканирования, но при угловой настройке призмы связи на возбуждение волноводной моды. Фактически на рис. 4, б приведён аналог темной *m*-линии в частотно-угловых координатах.

Из анализа зарегистрированных угловых зависимостей интенсивности света, отражённого вблизи углов возбуждения волноводных мод, следует, что внутрирезонаторная спектроскопия волноводных мод имеет ряд преимуществ по сравнению классической волноводной спектроскопией. К ним следует отнести прежде всего высокий контраст регистрации интенсивности излучения, регистрации сверхмалых потерь при слабой связи, когда небольшие значения коэффициента усиления некоторых газовых лазеров становятся явным преимуществом, а также возможность внутрирезонаторной перестройки излучения при использовании полупроводниковых лазеров.

а)



б)

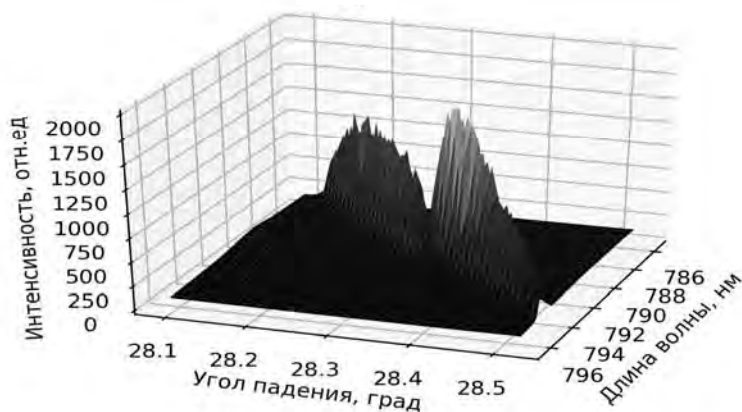


Рис. 4. Спектр излучения полупроводникового лазера с внешним резонатором и брюстеровской призмой связи без возбуждения волноводной моды (а) и с возбуждением (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dictionary of Physics (Oxford Quick Reference). – 7-th edition. – Oxford University Press, 2015. – 672 p.
2. **Шварцбург, А. Б.** Туннелирование электромагнитных волн – парадоксы и перспективы / А. Б. Шварцбург // УФН. – 2007. – Т. 177, № 1. – С. 43–58.
3. **Хомченко, А. В.** Волноводная спектроскопия тонких плёнок / А. В. Хомченко. – Минск: БГУ, 2002. – 223 с.
4. **Ваев, V. M.** Laser intracavity absorption spectroscopy / V. M. Baev, T. Latz, P. E. Toschek // Applied Physics B. – 1999. – № 69. – P. 171–202.
5. **Шульга, А. В.** Внутррезонаторная волноводная спектроскопия тонких пленок / А. В. Шульга, А. В. Хомченко, И. В. Шилова // Письма в ЖТФ. – 2018. – Вып. 21. – С. 3.
6. **Ye Canyon.** Tunable External Cavity Diode Lasers / Canyon Ye // World Scientific, Texas A&M University, USA, 2004. – 276 p.