

Поиск источника излучения на базе фотонно-кристаллического волокна для STED-литографии

Д.А.Глубоков, В.В.Сычев, А.Г.Витухновский, А.Е.Корольков

С использованием особенностей спектра излучения суперконтинуума, обусловленных генерацией в нем черенковских пиков, получен источник излучения с относительным уровнем шума порядка 10^{-6} , обладающий достаточной стабильностью для применения в STED-литографии.

Ключевые слова: суперконтинуум, STED-литография, фотонно-кристаллические волокна, черенковские пики суперконтинуума.

Развитие методов фотолитографии направлено в первую очередь на уменьшение характеристического размера элемента интегральных схем. Однако для этого требуется применение лазерных источников со все более короткими длинами волн излучения, вплоть до длин волн глубокого УФ диапазона [1]. Использование таких источников приводит к значительному удорожанию и усложнению фотолитографических систем. Поиск менее дорогостоящих и более простых методов увеличения разрешающей способности литографии – это актуальная технологическая проблема. Метод прямой лазерной записи на фоторезисте (direct laser writing) является реальной альтернативой применению сложных литографических систем, однако также имеет принципиальное ограничение на минимальный размер элемента, обусловленное дифракционным пределом Аббе для разрешающей способности используемой оптики.

Частично это ограничение может быть преодолено за счет применения фоторезиста, полимеризующегося при двухфотонном поглощении. В данном случае доза облучения фоторезиста будет пропорциональна не интенсивности, а квадрату интенсивности, что при гауссовом профиле пучка может привести к увеличению разрешающей способности в $\sqrt{2}$ раз. Повысить разрешающую способность оптической литографии можно также и за счет приближения максимума пространственного распределения интенсивности в сфокусированном пучке к порогу полимеризации фоторезиста. Это приведет к тому, что фоторезист будет полимеризоваться лишь в области наибольшей интенсивности, т. е. в центре фокального пятна. Таким способом можно достичь разрешения вплоть до 80 нм, что примерно в восемь раз меньше длины волны лазерного излучения. Однако данный метод имеет крайне высо-

кую чувствительность к флуктуациям интенсивности излучения лазера. Также при использовании этого способа литографии возникает проблема малой скорости релаксации фоторезиста после подпорогового облучения. Если для полимеризации одной точки достаточно высокой интенсивности в центре фокального пятна, то в соседней, вплотную к ней прилегающей точке, находившейся в момент облучения первой в зоне подпороговой интенсивности, может возникнуть при ее облучении полимеризация за пределами целевой зоны. Фоторезист должен иметь высокую скорость релаксации после подпорогового облучения.

Идея метода обеднения (уровней) при стимулированной эмиссии (STED), выдвинутая Стефаном Хэллом [2] и реализованная в виде STED-микроскопии [3], была адаптирована для использования в оптической литографии с целью значительного увеличения ее разрешающей способности.

Основная идея STED-метода заключается в применении второго лазера, излучение которого локально и обратимо запрещает процесс полимеризации фоторезиста. Длина волны этого излучения определяет объем полимеризуемого фоторезиста.

Возбуждающий лазерный импульс переводит молекулы фотоинициатора из основного состояния в возбужденное состояние S_1^* посредством двухфотонного поглощения. Некоторые молекулы могут сразу же безызлучательно перейти в основное состояние. Однако большая часть молекул релаксирует в промежуточное состояние S_1 , откуда они могут в свою очередь совершить либо люминесцентный, либо интеркомбинационный переход в триплетное состояние T_1 . Из состояния T_1 запускается реакция полимеризации фоторезиста. Стимулированное излучение деактивирующего лазера является основным механизмом опустошения состояния S_1 . Таким образом, локально, в области максимума интенсивности деактивирующего лазера, и обратимо запрещается процесс полимеризации фоторезиста, а размер разрешенной области, где происходит реакция полимеризации, может стать меньше дифракционного предела для излучения с используемой длины волны.

Наибольшая эффективность деактивирующего излучения наблюдается при длительности импульса порядка

Д.А.Глубоков, А.Е.Корольков. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: daglubokov@gmail.com

В.В.Сычев, А.Г.Витухновский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: vladvivas@list.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2012 г.

или меньше времени жизни возбужденного состояния люминесцирующего объекта, используемого в STED-микроскопии, либо люминесцентного красителя, применяемого в STED-литографии. Времена жизни возбужденного состояния могут составлять от единиц наносекунд для органических объектов [4], являющихся предметом рассмотрения при STED-микроскопии, до пикосекунд для фотоинициаторов используемых в STED-литографии [5].

Применение источников суперконтинуума в качестве источника деактивирующего излучения для STED-микроскопии позволяет увеличить как разрешающую способность системы [6], так и диапазон ее применимости за счет перестройки длины волны в очень широком спектральном интервале. Ввиду особенностей процесса STED-литографии полимеризация происходит под действием излучения с интенсивностью, близкой к пороговым значениям, что накладывает жесткие требования на стабильность лазерных источников. Длительность импульсов, получаемых с помощью источников суперконтинуума на основе фотонно-кристаллических волокон, составляет от 50 фс до 2 пс [7], что удовлетворяет необходимому условию для реализации STED-литографии высокого разрешения. Однако эти источники имеют низкую стабильность интенсивности генерируемого излучения, что вызвано стохастическими процессами, ответственными за механизм генерации. Одновременно любые шумы, имеющие место в излучении накачки, усиливаются в волокне за счет нелинейного характера взаимодействия излучения.

Для увеличения стабильности излучения, генерируемого фотонно-кристаллическими волокнами при накачке фемтосекундным лазером на кристалле титан-сапфира, использовалась особенность механизма генерации суперконтинуума, связанная с формированием черенковских пиков в его спектре.

Процессы временного и пространственного самовоздействия мощных лазерных импульсов в фотонно-кристаллических волокнах приводят к формированию временных солитонов [8]. Фазовая скорость солитона вдоль оси волокна превышает фазовую скорость излучаемой дисперсионной волны, резонансное излучение направлено под некоторым углом к оси волокна. Излучение дисперсионной волны солитоном аналогично испусканию электромагнитного излучения заряженной частицей, движущейся в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость излучаемой волны (черенковское излучение солитона) [9]. Черенковское излучение солитонов проявляется в виде интенсивных спектральных линий в коротковолновой части спектра широкополосного излучения, формируемого на выходе фотонно-кристаллического волокна при условии, что хотя бы часть спектра входного излучения попадает в область аномальной дисперсии или переносится в эту область в результате нелинейно-оптического взаимодействия в самом волокне.

Проведенные исследования показали, что интенсивность черенковских пиков имеет на порядок большую стабильность, чем интенсивность суперконтинуума во всем остальном спектральном диапазоне генерации, используемом в большинстве прикладных задач.

Исследуемый спектр суперконтинуума, полученный при накачке фотонно-кристаллического волокна DNV125 (НЦВО РАН), приведен на рис.1. Для накачки волокна использовалось излучение фемтосекундного лазера на кристалле титан-сапфира с длиной волны 810 нм, длительностью импульсов 200 фс, частотой их следования 74 МГц и

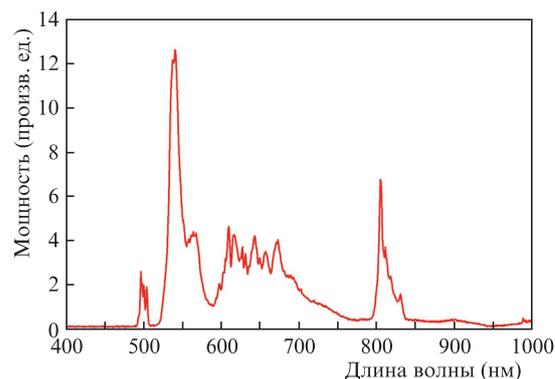


Рис.1. Спектр излучения суперконтинуума, генерируемого в фотонно-кристаллическом волокне DNV125.

средней мощностью 230 мВт. Выходная суммарная мощность излучения суперконтинуума составляла при этом 63 мВт. При таких параметрах черенковский пик формировался на длине волны 543 нм.

Стабильность и шумы интенсивности генерации как черенковского пика, так и излучения суперконтинуума в видимом спектральном диапазоне были измерены на экспериментальной установке, состоящей из монохроматора МДР-12, балансного фотоприемника и синхронного детектора SR-830. Синхронный детектор осуществляет детектирование в частотном диапазоне 0–100 кГц.

Из спектра суперконтинуума монохроматором вырезались спектральные полосы шириной 20 нм со средними длинами волн 543, 598, 650 и 820 нм, соответствующими длине волны черенковского пика, двум длинам волн в области стохастической генерации суперконтинуума и длине волны остаточного излучения накачки. Излучение в указанных диапазонах попадало на площадку балансного фотоприемника. Измерения проводились при сигнале фотоприемника 1 В. Для регистрации шумовых характеристик напряжение с фотоприемника подавалось на синхронный детектор. Зависимости шумового сигнала от частоты модуляции для четырех длин волн, выделенных из спектра суперконтинуума, приведены на рис.2. При нормировке сигнала балансного приемника на 1 В измеренный относительный уровень шума для черенковского пика и остаточного излучения накачки достигал 10^{-6} , в то время как для остального спектра он составлял $10^{-5} - 10^{-4}$. Таким образом, стабильность источника черенковского

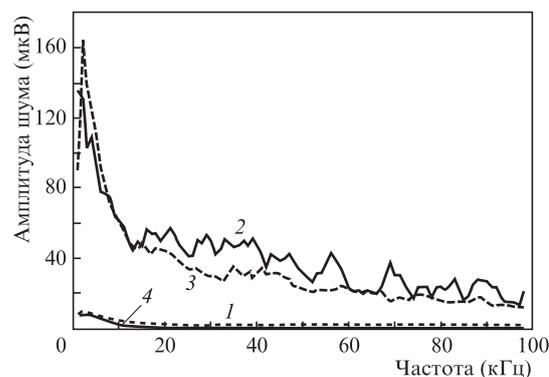


Рис.2. Зависимость амплитуды шумов от частоты модуляции возбуждающего импульса для длин волн 543 (1), 598 (2), 650 (3) и 820 нм (4), выделенных из спектра излучения суперконтинуума, генерируемого в фотонно-кристаллическом волокне DNV125.

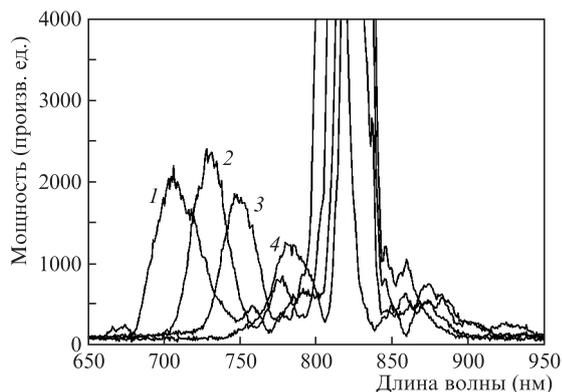


Рис.3. Спектр излучения суперконтинуума при длинах волн накачки 828 (1), 824 (2), 819 (3) и 810 нм (4).

излучения значительно превышает стабильность источников суперконтинуума.

Для реализации перестраиваемого источника необходимо добиться изменения длины волны генерации черенковского пика. Для этого осуществлялась перестройка длины волны накачки фемтосекундного лазера в диапазоне ~ 25 нм в зоне аномальной дисперсии волокна вблизи длины волны нулевой дисперсии (785 нм), что и привело к изменению длины волны генерируемого черенков-

ского пика в диапазоне 710–780 нм. Данный эффект иллюстрирует рис.3.

В заключение хотелось бы отметить, что полученный перестраиваемый источник излучения с относительным уровнем шума 10^{-6} может быть использован в литографических STED-системах для повышения их разрешающей способности.

Работа частично поддержана программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов». Выражаем отдельную благодарность Научному центру волоконной оптики РАН за предоставленные экспериментальные фотонно-кристаллические волокна.

1. Stamm U. *J. Phys. D*, **37**, 3244 (2004).
2. Hell S.W., Wichmann J. *Opt. Lett.*, **19**, 780 (1994).
3. Klar T.A., Jakobs S., Dyba M., Egner A., Hell S.W. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **97**, 8206 (2000).
4. Willig K.I., Rizzoli S.O., Westphal V., Jahn R., Hell S.W. *Nature*, **440**, 935 (2006).
5. Wolf T.J.A., Fischer J., Wegener M., Unterreiner A.-N. *Opt. Lett.*, **36**, 3188 (2011).
6. Wildanger D., Rittweger E., Kastrup L., Hell S.W. *Opt. Express*, **16** (13), 9614 (2008).
7. Dudley J.M., Genty G., Coen S. *Rev. Mod. Phys.*, **78** (4), 1135 (2006).
8. Ouzoumov D.C., Ahmad F.R., Muller D., et al. *Science*, **301**, 1702 (2003).
9. Akhmediev N., Karlsson M. *Phys. Rev. A*, **51**, 2602 (1995).