

ЭЛЕКТРОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФАЗЕ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

*Н.Р.Белашенков, В.Б.Карасев, А.А.Солунин, И.А.Хазаев,
К.Ш.Цибадзе, Ф.А.Чудновский*

Вопрос о динамике нелинейно-оптических свойств диоксида ванадия долгое время обсуждался в ряде работ [1-5]. В [3-5] с использованием пикосекундной спектроскопии временного разрешения было показано, что в нелинейном отклике пленок диоксида ванадия присутствуют две компоненты — быстрая и медленная.

Медленная компонента нелинейного отклика демонстрировала пороговый характер по отношению к возбуждающему импульсу, совпадала по поляризации с поляризацией зондирующего пучка и была значительно затянута во времени относительно возбуждающего импульса. В связи с этим наличие медленной компоненты объяснялось как результат переключения оптических свойств при фотостимулированном фазовом переходе полупроводник-металл (ФППМ) в VO_2 . Энергетические и временные характеристики медленной компоненты хорошо совпадают с оценками чисто тепловой динамики переключения [1].

В то же время быстрая компонента в [3-5] совпадала по поляризации с поляризацией возбуждающего излучения, не имела выраженного порога возбуждения и совпадала по длительности с возбуждающим импульсом. Это дало основание авторам [3-5] связать появление и динамику быстрой компоненты нелинейного отклика с генерацией-рекомбинацией электронно-дырочных пар и оценить время жизни фотовозбужденных носителей в диоксиде ванадия в 27-30 ps.

Мы исследовали динамику оптических характеристик диоксида ванадия при использовании интерференционной структуры на основе VO_2 как нелинейного зеркала в резонаторе импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме синхронизации мод.

Для реализации этого эксперимента мы использовали образцы пленок диоксида ванадия в качестве затворов в резонаторе $\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$ лазера. Для получения различных величин начальной отражательной способности затворов были использованы пленки различной толщины, нанесенные на алюминиевый зеркальный подслой. В качестве подложек использовались монокристаллические сапфир и кремний, обладающие высокой теплопроводностью. Пленки были изготовлены методом реактивного вакуумного осаждения [6], толщина пленок составляла 500-600 Å.

Эксперименты проводились как в линейной схеме синхронизации мод (рис. 1,а), так и в схеме со сталкивающимися импульсами (рис. 1,б). Кроме того, применялось также управление добротностью резонатора (УДР) с использованием системы электрооптической отрицательной обратной связи (рис. 1,с).

Для регистрации импульсов использовались фотоэлектрический приемник типа ФК-26 со скоростным осциллографом, а также

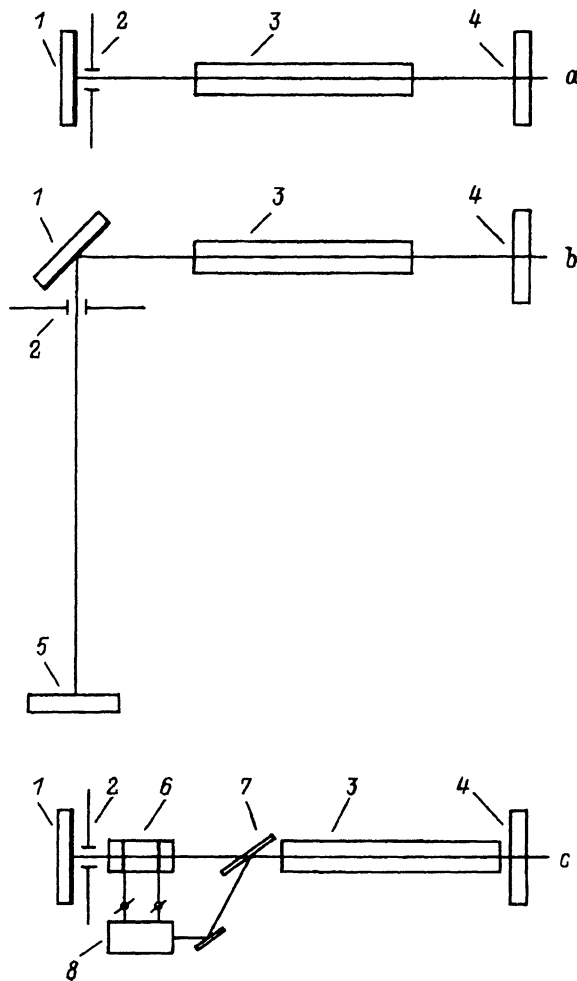


Рис. 1. Оптические схемы лазеров с модуляторами на основе пленок VO_2 .

a — линейная схема резонатора,
b — схема резонатора со сталкивающимися импульсами,
c — схема резонатора с управляемой добротностью.

1 — модулятор на основе пленки VO_2 ,
 2 — диафрагма,
 3 — активный элемент,
 4 — выходное зеркало резонатора,
 5 — «глухое» зеркало резонатора,
 6 — электрооптический затвор,
 7 — поляризационное зеркало,
 8 — система управления добротностью резонатора.

электронно-оптическая камера с линейной разверткой (streak-camera) типа АГАТ-СФЗ (рис. 2, 3).

Наилучшие результаты по совокупности параметров (лучевая стойкость, длительность, контраст и воспроизводимость сверхкоротких импульсов) были получены для пленки толщиной 550 \AA на подложке из сапфира. Отражательная способность зеркала изменялась при фотостимулированном переключении от уровня $R_s = 0.35$ (полупроводниковая фаза диоксида ванадия) до уровня $R_m = 0.56$ (металлическая фаза).

Нужно отметить, что быстрые процессы изменения отражательной способности зеркала, приводящие к синхронизации мод, наблюдались для полупроводниковой фазы VO_2 . В самом деле, в линейной схеме при длине резонатора 120 см и коэффициенте отражения выходного зеркала 35% генерация моды TEM_{00} начиналась при энергии накачки $W_{\text{thresh}} \approx 15 \text{ Дж}$, причем синхронизация мод наблюдалась при всех энергиях накачки, при которых имела место генерация. При увеличении

Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации лазера с пассивным модулятором на основе пленки VO_2 .

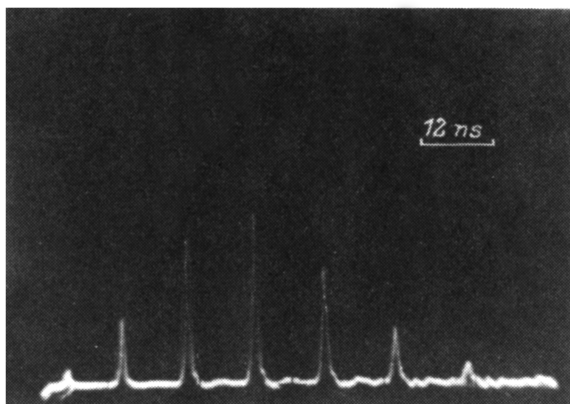


Рис. 3. Хронограмма одиночного сверхкороткого импульса.

энергии накачки до $W_m \approx 22.5 \text{ J}$ происходило переключение зеркала в результате фотостимулированного ФППМ в пленке VO_2 и наблюдалось появление импульса модуляции добротности.

Минимальная длительность импульса, полученного в режиме синхронизации мод, составляла $\tau = 32 \text{ ps}$. Отметим, что в предыдущих экспериментах по синхронизации мод с использованием нелинейного зеркала на основе VO_2 [2] длительность пика составляла около 3 ps . Таким образом, полученная нами длительность импульса совпадает с оценками времени жизни быстрой компоненты нелинейного отклика, полученными в [4,5].

Как известно [7], в режиме пассивной синхронизации мод минимальная длительность полученного импульса дает верхнюю границу времени жизни фотовозбужденных электронов в веществе пассивного затвора.

В то же время из результатов экспериментального определения параметров осцилляторов, описывающих особенности спектра отражения VO_2 в ИК-диапазоне [8], следует, что характерные времена электронных релаксаций в диоксиде ванадия имеют порядок 10^{-14} s . Кроме того, деформация решетки в полупроводниках при пикосекундном возбуждении происходит за времена порядка 10^{-13} s [9]. Однако и в наших экспериментах, и в работах [4,5] длительность быстрой компоненты отклика составляла около 30 ps . Поскольку во всех этих экспериментах использовался лазер на гранате с неодимом, то величина порядка 30 ps , очевидно, соответствует обратной ширине контура усиления [7]. Вследствие этого по результатам наших экспериментов мы не можем отдать предпочтение чисто электронным или электрон-фононным релаксациям, так как для определения вклада того или иного канала релаксации требуются гораздо более короткие времена.

Можно привести ряд соображений о механизме, ответственном за быстрые изменения отражательной способности исследуемого зеркала. В подпороговом режиме суперлюминесцентное излучение в резонаторе лазера вызывает переходы электронов в диоксиде ванадия из валентной зоны в зону проводимости. В рамках представлений о механизме ФППМ в VO_2 [10,11] при увеличении концентрации электронов проводимости ширина запрещенной зоны в полупроводниковой фазе VO_2 уменьшается. Вследствие этого край поглощения смещается в длинноволновую область и коэффициент поглощения α для длины волны генерации ($1.06 \mu\text{m}$) возрастает. Конструкция нелинейного зеркала как широкополосного пленочного интерферометра [12] переводит увеличение поглощения в пленке VO_2 в увеличение отражательной способности зеркала. Таким образом, принцип работы пассивного затвора на основе VO_2 существенно отличается от принципа работы затворов на основе соединений A^3B^5 , в которых поглощение уменьшается за счет эффекта Мосса-Бурштейна [13].

В заключение авторы хотели бы выразить признательность Е.Б.Шадрину и Ю.М.Гербштейну за плодотворное обсуждение результатов экспериментов. Авторы также благодарят Б.П.Захарченко за интерес к работе.

Список литературы

- [1] Капаев В.В., Тимеров Р.Х. // Микроэлектроника. 1976. Т. 5. № 4. С. 338-343.
- [2] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. № 12. С. 643-647.
- [3] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 36. № 6. С. 363-365.
- [4] Bugaev A.A., Cudyalis V.V., Klochkov A.V. // Sov. Phys. Solid State. 1983. V. 25. N 6. P. 1091-1093.
- [5] Бугаев А.А., Гудялис В.В., Клочков А.В. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 5. С. 1463-1467.
- [6] Case F.C. // Applied Optics. 1987. V. 26. N 8. P. 1550-1553.
- [7] Херман Й., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир, 1986. 368 с.
- [8] Barker A.S., Verleur H.W., Guggenheim H.J. // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 17. N 26. P. 1286-1289.
- [9] Капаев Ю.В., Меняйленко В.В., Молотков С.Н. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. № 4(10). С. 1404-1415.
- [10] Raquet D., Leroux-Hugon P. // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. N 11. P. 5284-5301.
- [11] Никитин С.Е., Хахаев И.А., Чудновский Ф.А., Шадрин Е.Б. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 10. С. 2719-2723.
- [12] Захарченя Б.П., Мешковский И.К., Теруков Е.И., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. № 1. С. 8-11.
- [13] Tsou Y., Garmire E., Chen W., Birnbaum M., Asthana R. // Optics Letters. 1993. V. 18. N 18. P. 1514-1516.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
2 февраля 1994 г.