

**Динамика сверхбыстрого фотоиндуцированного фазового перехода
в диоксиде ванадия***И. С. Гибин, П. Е. Котляр*

Диоксид ванадия VO_2 , в котором фазовый переход осуществляется при наиболее «технологичной» температуре $+67^\circ C$, изменение удельного сопротивления составляет около пяти порядков, показатель преломления изменяется (на $\lambda = 6328 \text{ \AA}$) от 2,5 до 2,0, а время переключения рекордно малое, считается наиболее перспективным материалом современной оптоэлектроники. Рассмотрены ключевые эксперименты по исследованию динамики сверхбыстрого обратимого фазового перехода «металл–диэлектрик» в диоксиде ванадия, имеющего рекордно малое время переключения (10 фс). Это свойство диоксида ванадия может быть использовано для создания уникальных оптических затворов, которые найдут применение при исследовании быстротекущих процессов, в разработке систем оптических телекоммуникаций, а также в различных областях оптоэлектроники и фотоники.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход, пленка, металл, диэлектрик, сверхбыстрый, кристаллическая структура.

Ссылка: Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 73.

Reference: I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Prikl. Fiz., No. 6, 73 (2019).

Введение

В 1971 г. Roach W. R. и Balberg I. [1] впервые обнаружили, что мощный короткий лазерный импульс может вызывать сверхбыстрый обратимый фазовый переход в ультратонких (менее 100 нм) пленках диоксида ванадия. При фазовом переходе пленочный образец переходит из прозрачного диэлектрического состояния в состояние проводника

с зеркальной поверхностью за характерное время в 10 фс. По современным представлениям, быстрота смены фазового состояния объясняется тем, что при переходе происходит некое перераспределение электронов, атомы ванадия почти не смещаются, а атомы кислорода смещаются на доли ангстрема. При облучении поверхности VO_2 квантами света с энергией 1,17 эВ обратный фазовый переход из металлической фазы в полупроводниковую происходит практически безынерционно, а при энергии 2,34 эВ происходит с задержкой $\sim 10^{-9}$ с после прекращения облучения.

Сверхбыстрый фазовый переход

Обратимый фазовый переход «металл–изолятор» (MIT) сопровождается большими и быстрыми изменениями электрических, оптических, тепловых и магнитных свойств вблизи точки фазового перехода. Помимо температуры, фазовый переход в диоксиде ванадия может происходить под влиянием электрическо-

Гибин Игорь Сергеевич^{1,2}, г.н.с., д.т.н., профессор.
Котляр Петр Ефимович¹, вед. инженер, д.г.-м.н., профессор.

¹ Институт автоматизации и электротехники СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Коптюга, 1.

Тел.: +7(913) 464-27-06, +7(903) 935-16-31.

E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

² Новосибирский государственный технический университет.

Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2019 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2019

го поля, электронной инжекции, оптических и деформационных возбуждений или электромагнитного излучения терагерцового диапазона. В некоторых случаях сочетание двух или более возбуждений может привести к переходу на разных порогах температуры. В последние годы основное внимание исследователей концентрируется на исследованиях условий, при которых фазовый переход в диоксиде ванадия осуществляется в пикосекундном диапазоне. В 1971 г. Roach W. и Balberg I. [1] впервые наблюдали обратимый фазовый переход «металл-изолятор» в пленочных образцах VO_2 , оптически индуцированный с помощью 20нс-импульса рубинового лазера. Фазовый переход детектировали путем

наблюдения отраженного от поверхности пленки пучка He-Ne-лазера. При развитии этих исследований Бугаевым и Cavalleri [2, 3] были получены критические значения плотности энергии лазерного импульса $W_e = 12 \text{ мДж/см}^2$ и оценочные значения концентрации дырок $p_0 = 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, вызванной прохождением лазерного импульса, толщины образующегося металлического слоя $z_0 = 50 \text{ нм}$, времени образования металлического слоя $\Delta t = 500 \text{ фс}$.

Кинетика развития фазового перехода в пленочном диоксиде ванадия при облучении лазерным импульсом с регистрацией изменения коэффициента отражения представлена на рис. 1.

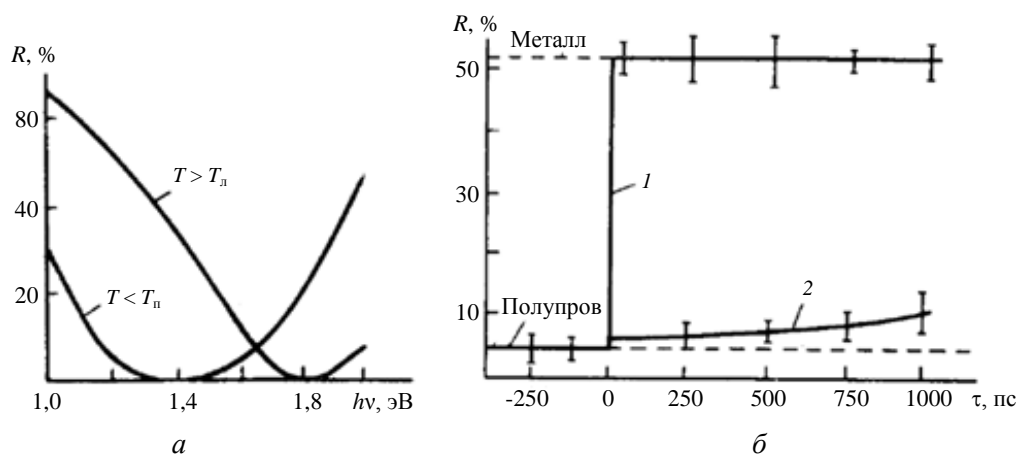


Рис. 1. Кинетика развития фазового перехода в пленочном диоксиде ванадия при облучении лазерным импульсом с регистрацией изменения коэффициента отражения: а – спектральная зависимость коэффициента отражения; б – кинетика развития фазового перехода, где линия 1 – возбуждение с $h\omega = 1,17 \text{ эВ}$, 2 – возбуждение с $h\omega = 2,34 \text{ эВ}$ по [2].

В настоящее время установлено, что под действием мощного лазерного импульса пленка двуокиси ванадия на подложке может переходить из полупроводникового состояния в металлическое за время $t < 1 \text{ пс}$, нагреваясь при этом менее чем на 10 К. Данный фазовый переход имеет нетепловую природу, поскольку для развития тепловой неустойчивости требуется нагревание пленки VO_2 приблизительно на 50 К (до 340 К).

Рентгеноструктурные исследования [4, 5] показали, что при облучении монокристалла двуокиси ванадия лазерным импульсом с длительностью $\tau_p \approx 50 \text{ фс}$, длиной волны 800 нм и плотностью энергии $W \approx 15 \text{ мДж/см}^2$ фотоиндуцированный фазовый переход «полупроводник–металл» протекает следующим обра-

зом. При облучении тонкопленочного образца VO_2 в металлическую фазу за характерное время $t \approx 0,5 \text{ пс}$ переходит лишь поверхностный слой толщиной $z_0 \approx 50 \text{ нм}$. На временах от 1 до 3 пс толщина образовавшегося металлического слоя не меняется. На временах от 3 до 12 пс толщина металлического слоя увеличивается от 50 до 250 нм.

Оптические исследования [6–8] показали, что при облучении тонкой (толщиной $\approx 200 \text{ нм}$) монокристаллической пленки двуокиси ванадия лазерным импульсом с плотностью энергии $W \approx 12 \text{ мДж/см}^2$ металлическая фаза появляется через время $t \approx 0,9 \text{ пс}$. При плотности энергии лазерного импульса $W \approx 10 \text{ мДж/см}^2$ время появления металлической фазы увеличивается приблизительно в 10 раз до значения

$t \approx 10$ пс. Таким образом, старт фотоиндуцированного фазового перехода «полупроводник–металл» наблюдается, если плотность энергии лазерного импульса W превышает критическое значение $W_c \approx 12$ мДж/см².

Одним из важнейших результатов этих работ явилось установление того факта, что переход в отражающее состояние вызван не ростом температуры, а за счет изменения структуры диоксида ванадия при непосредственном поглощении лазерного излучения.

В работе [9] было показано, что облучением потоком электронов можно перевести пленку VO₂ в металлическое состояние, индуцировав принудительный фазовый переход «диэлектрик–металл» в широком интервале температур: от 340 К (67 °С) до 1,6 К, причем неизменность сечения функции распределения коэрцитивных температур, отражающего распределение петель гистерезиса по ширинам, по мнению авторов, свидетельствует о том, что возмущение решетки полем дефектов, возникающих при облучении, мало. Это означает, что в таком эксперименте удастся в чистом виде наблюдать электронный фазовый переход в диоксиде ванадия. Экспериментально было показано [10], что при максимальных дозах электронной бомбардировки образец представляет собой пленочную полупроводниковую матрицу, пронизанную сеткой одномерных проводящих нитей толщиной несколько десятков ангстрем.

В 2000 г. Стефанович и соавторы [11] сообщили, что электрическое поле или электронная инжекция в VO₂ может вызвать MIT. Соответственно Leroy J. с соавторами [12] сообщили о быстром фазовом переходе в тонкой пленке VO₂ в пикосекундном диапазоне, вызванном импульсным электрическим полем.

В 2001 году Cavalleri et al. [3] использовали фемтосекундные импульсы рентгеновского и видимого света для изучения структуры и кинетики электронных переходов оптически управляемого фазового перехода в VO₂. Они обнаружили, что лазерные импульсы с достаточно высокой плотностью энергии могут вызывать субпикосекундный структурный переход, который осуществляется за рекордно короткое время (~ 100 фс) [7, 8].

В представленных ниже четырех таблицах, материалы для которых заимствованы из обзора Zheng Yang et al.[13], систематизированы экспериментальные результаты по инициации фазового перехода в тонкопленочных образцах диоксида ванадия, осуществляемого ультракороткими лазерными импульсами высокой интенсивности. Таблицы различаются использованием различных физических методов наблюдения динамики фазового перехода, что чрезвычайно важно для выяснения физики процессов.

Таблица 1 обобщает экспериментально измеренные постоянные времени фазового перехода в VO₂ с помощью с регистрации изменения оптических параметров образца.

Таблица 1

Экспериментальные наблюдения сверхбыстрого фазового перехода с регистрацией изменения оптических параметров образца

Автор, Год, Источник	VO ₂ образец	Инициация фазового перехода (источник излучения)	Время фазового перехода	Критерии наблюдения фазового перехода
Becker M. F., Buckman A. B. et al., 1994, [6]	Поликристаллическая тонкая пленка, полученная напылением	780 нм Тi-сапфировый лазер	~5 пс	Изменение показателя преломления, полученное из спектров отражение-пропускание
Cavalleri A., Toth C. et al., 2001, [3]	кристаллическая тонкая пленка на стеклянной подложке	800 нм, 50 фс оптический импульс	100 фс –50 пс	Изменение отражательной способности образца. Время фазового перехода определяется мощностью зондирующего импульса
Cavalleri A., Dekorsy T. et al., 2004, [7]	Тонкая пленка на SicSi ₃ N ₄ буферным слоем	15 фс оптический импульс	75 фс –454 фс	Изменение отражательной способности образца. Время фазового перехода определяется длительностью зондирующего импульса
Lysenko S., Rua A., et al., 2007, [8]	Тонкая пленка, выращенная на сапфире, MgO и стекле PLD напылением	400 нм, 130 фс, 50 Гц импульс Тi-сапфировый лазер	10 пс –1 нс	Изменение отражательной способности образца. Время фазового перехода определяется толщиной VO ₂ пленки и мощностью зондирующего импульса

В экспериментах, представленных в табл. 1, в качестве источника излучения для инициации фазового перехода используются титан-сапфировые лазеры. Эти устройства генерируют ультракороткие импульсы сверхвысокой интенсивности длительностью от нескольких пс до 10 фс. Полученное время

фазового перехода от 75 фс до 50 пс зависит от длительности (подводимой мощности) зондирующего импульса и фиксируется самым быстрым методом по изменению показателя преломления.

Динамика фазового перехода представлена на рис. 2.

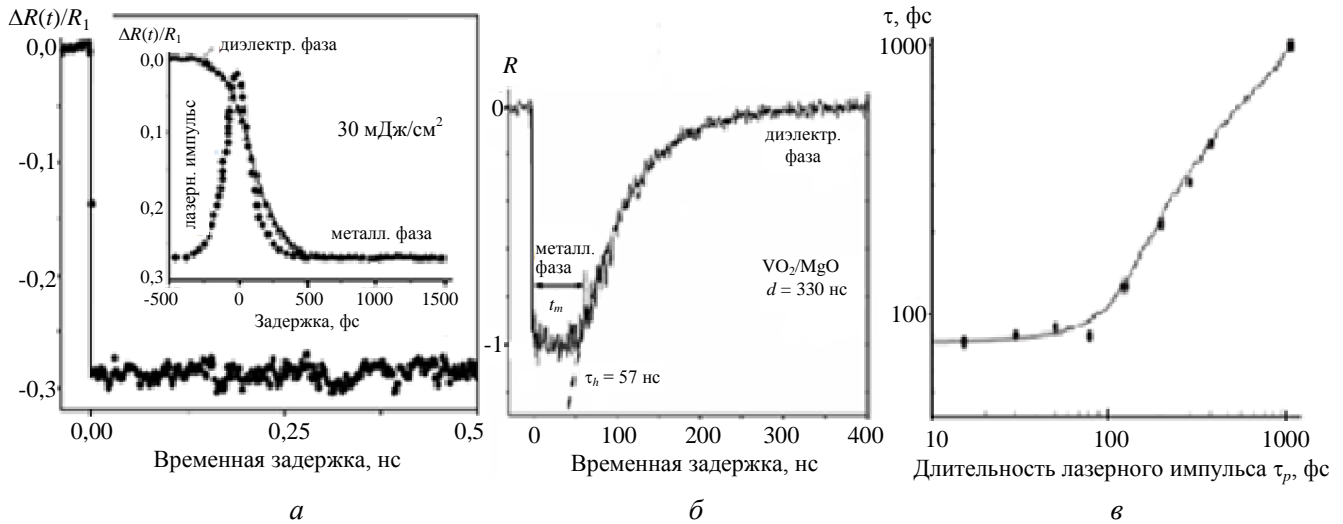


Рис. 2. Динамика фазового перехода: а, б – в пленочном диоксиде ванадия при облучении лазерным импульсом с регистрацией изменения коэффициента отражения по [14]; в – зависимость времени τ фотоиндуцированного фазового перехода от длительности τ_p лазерного импульса с плотностью энергии $W = 50 \text{ мДж/см}^2$ по [15].

Лазерные импульсы длительностью 12 фс вызывают изменение прозрачного состояния пленки на отражающее, причем это состояние длится не более 100 фс, затем пленка снова становится прозрачной.

В табл. 2 представлены результаты экспериментов, в которых для изучения действительной и мнимой компонент проводимости пленок используют метод терагерцовой спектроскопии

во временной области. Метод позволяет с высоким разрешением непосредственно детектировать электрическое поле терагерцового импульса с длительностью порядка 1 пс. Измерение электрического поля позволяет извлечь информацию не только об изменении амплитуды поля при его взаимодействии с объектом, но и о сдвиге фазы, а значит, открывает возможности для исследования сверхбыстрых процессов.

Таблица 2

Экспериментальные наблюдения сверхбыстрого фазового перехода с регистрацией методом терагерцовой спектроскопии

Автор, Год, Источник	VO ₂ образец	Инициация фазового перехода (источник излучения)	Время фазового перехода	Критерии наблюдения фазового перехода
Kubler C., Ehrke H., et al., 2007, [16]	Поликристаллическая тонкая пленка, алмазное окно	1,55 эВ, 12 фс, 800 кГц Ті-сапфировый лазерн. импульс	130 фс	Временная задержка до первого цикла изменения электронной проводимости
			~ 10 пс	Насыщение изменений проводимости
Nakajima M., Takubo N., et al., 2008, [17]	Монокристаллы и тонкие пленки, выращенные на сапфире PLD напылением	800 нм, 50–150 фс, 5 кГц / 1 кГц Ті-сапфировый лазерн. импульс	0,7 пс	Резкое изменение пропускания образца
			100 пс	Насыщение изменение пропускания образца

В табл. 3 представлены результаты экспериментов, в которых для изучения динамики фазового перехода используется классический метод регистрации дифракции рентгеновских лучей.

На рис. 3 представлены изменения дифракционной интенсивности как функции времени и мощности накачки для пиков, соответствующих соответственно быстрой (~ 310 фс) и медленной (~ 1,6 пс) динамике фазового перехода в пленочном диоксиде ванадия.

Таблица 3

Экспериментальные наблюдения сверхбыстрого фазового перехода с регистрацией дифракции рентгеновских лучей

Автор, Год, Источник	VO ₂ образец	Инициация фазового перехода (источник излучения)	Время фазового перехода	Критерии наблюдения фазового перехода
Cavalleri A., Toth C., et al., 2001, [3]	Кристаллическая тонкая пленка на стеклянной подложке	800 нм, 50 фс оптический импульс	~1 пс	Изменение угла дифракции рентген. лучей от 13,7° рутил. фазы (110) до 13,9° моноклин. фазы (011)
Kim H. T., Lee Y. W., et al., 2006, [4]	Тонкая пленка, выращенная на сапфире золь-гель методом	780 нм, 20 фс, 92 МГц Ti-сапфиров. лазерн. импульс	~300 фс	Металлич. фаза (110) с пиком 13,8° появляется после рентген. облучения
Hada M., Okimura K., et al., 2010, [5]	Высокоструктурированная тонкая пленка, выращенная на сапфире PLD напылением	800 нм, фемтосекундн. оптический импульс	25 пс	Моноклин. фаза (020) с пиком 39,86° сменяется на рутил. фазу (020) с пиком 39,77° в дифракц. картине
			~100 пс	Структурные изменения, вызванные уменьшением колебаний атомов

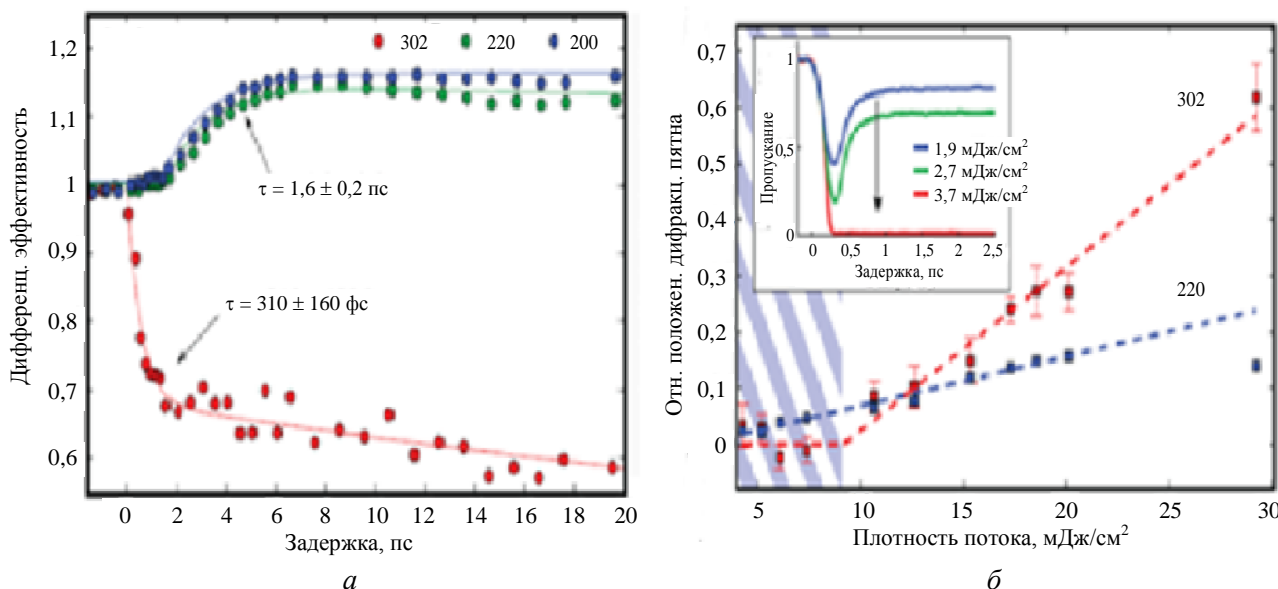


Рис. 3. Изменения дифракционной интенсивности: а – дифракционная интенсивность как функция времени для пиков, соответствующих соответственно быстрой (~310 фс) и медленной (~1,6 пс) динамике VO₂ IMT; б – относительные амплитуды как функция пиковой плотности потока, соответствующей быстрой и медленной динамике (заштрихованная часть представляет диапазон плотности потока, для которого не наблюдается структурный переход, в то время как вставленный график показывает коэффициент пропускания инфракрасного излучения (5 мкм) как функцию времени для плотности потока излучения, соответствующего заштрихованной части) по [3].

В табл. 4 представлены результаты экспериментов, в которых для изучения динамики фазового перехода используется четырехмерная сверхбыстрая электронная микроскопия. Метод основан на использовании сверхбыстрого просвечивающего электронного микроскопа для проведения исследований динамических процессов в образцах путём возбуждения их фемтосекундными лазерными импульсами и зондирования возникающих быстропротекающих процессов с помощью импульсного фотоэлектронного пучка длительностью ~ 7 пс и регулируемой задержки

относительно возбуждающего импульса. Регистрируется смещение атомов ванадия по дифракции электронов.

Обобщение серии процессов, происходящих в пленочном образце VO_2 во время фотоиндуцированного фазового перехода представлено в работах [21, 22], посвященных последним достижениям в области механизма фазового перехода в диоксиде ванадия. Одна из возможных моделей субпикосекундного фазового перехода под действием мощного лазерного импульса графически представлена на рис. 4.

Таблица 4

Экспериментальные наблюдения сверхбыстрого фазового перехода с регистрацией четырехмерной сверхбыстрой электронной микроскопией

Автор, Год, Источник	VO_2 образец	Инициация фазового перехода (источник излучения)	Время фазового перехода	Критерии наблюдения фазового перехода
Grinolds M. S., Lobastov V. A., et al., 2006, [18]	Поликристаллическая тонкая пленка на слюдяной подложке выращенная золь-гель методом	776 нм, фемтосекундн. оптический импульс	$3,1 \pm 0,1$ пс	Изменение амплитуды (302)-М электронного дифракционного пика
Lobastov V. A., Weissenrieder J., et al., 2007, [19]	Поликристаллическая тонкая пленка на слюдяной подложке выращенная золь-гель методом	776 нм, фемтосекундн. оптический импульс	3 ± 1 пс	Интегрирован. изменения интенсивности (302)-М электрон. дифракционного пика
Baum P., Yang D. S. et al., 2007, [20]	Монокристаллы	800 нм, фемтосекундн. оптический импульс	порядка фс	Увеличение связи V-V, наблюдаемое по дифракции электронов
			порядка пс	Смещение атомов ванадия наблюдаемое по дифракции электронов
			порядка 100 пс	Сдвиг фазы звуковой волны наблюдаемый по дифракции электронов

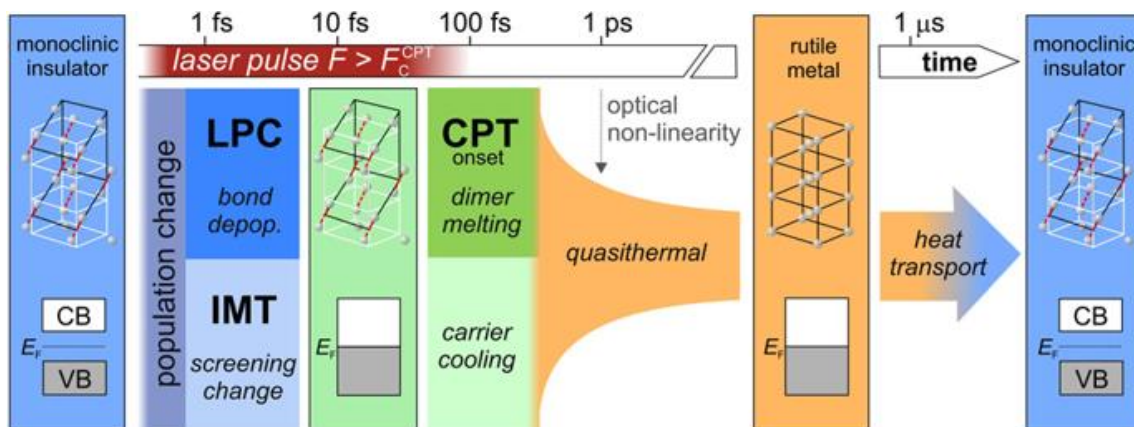


Рис. 4. Временные шкалы основных шагов в сверхбыстром фотоиндуцированном фазовом переходе в диоксиде ванадия. Сокращения: CB – зона проводимости; VB – валентная зона; LPC – изменение потенциала решетки; IMT – переход «металл-диэлектрик»; CPT – кристаллографический фазовый переход.

Поглощение излучения лазерного импульса с плотностью энергии выше критической ($14,7 \text{ мДж/см}^2$) приводит к генерации фотоиндуцированных дырок в верхней части валентной зоны, фотовозбуждению электронных переходов и коллапсу запрещенной зоны и в то же время к разрушению V-V связывающих орбиталей, что приводит к изменению решеточного потенциала, так как новое распределение заряда изменяет силы, действующие на ионы. На первом этапе происходит продвижение электронов из валентной зоны в свободную, а затем происходит схлопывание запрещенной зоны из-за изменения экранирования кулоновского взаимодействия через свободные носители. В завершение процесса пленка VO_2 восстанавливается до исходного состояния за время, зависящее от плотности потока лазерного импульса, в результате переноса тепла от пленки на подложку. Было установлено, что время перестройки кристаллической решетки VO_2 составляет менее 10^{-12} с, что значительно меньше времени тепловой релаксации. Это происходит при облучении поверхности VO_2 квантами света $h\nu_1 = 1,17 \text{ эВ}$, соответствующими электронным переходам между подзонами d_{II} .

По данным [22], обратный фазовый переход «металл–полупроводник» происходил практически безынерционно. Другая ситуация наблюдалась при освещении квантами света $h\nu_2 = 2,34 \text{ эВ}$, соответствующим возбуждению электронов из нижележащей O_{2p} -зоны в верхнюю незаполненную часть d_{II} -зоны. В этом случае переход из металлической фазы в полупроводниковую после прекращения облучения происходил с задержкой $\sim 10^{-9}$ с, связанной с переходом дырок из O_{2p} -зоны в нижнюю половину d_{II} -зоны.

Заключение

Обнаружение сверхбыстрого обратимого фазового перехода в тонких пленках диоксида ванадия, инициируемого короткими лазерными импульсами высокой интенсивности подтверждено многочисленными экспериментами, выполненными в ведущих физических лабораториях. Сверхбыстрый обратимый фазовый переход может быть инициирован также короткими рентгеновскими импульсами, элект-

ронной бомбардировкой образца и импульсным электрическим полем высокой напряженности. Сверхбыстрые, со временем порядка 10^{-13} с, фотоиндуцированные фазовые переходы в новое кристаллическое или аморфное состояние экспериментально наблюдались также в Si и GaAs [23]. Уникальное сочетание сверхвысокого быстродействия, чрезвычайно широкого диапазона изменения электрических и оптических параметров, тонкопленочная (близкая полупроводниковой) технология и работа при комнатной температуре создают реальные предпосылки для создания оптических затворов с рекордным быстродействием для исследования быстропротекающих процессов и принципиально новых логических устройств и устройств памяти. Оптические затворы с временем переключения порядка 10 фс создают принципиально новые возможности в спектроскопии комбинационного рассеяния и терагерцовой спектроскопии реального времени. Интеграция оптики и электроники считается следующим шагом в эволюции информационных и коммуникационных технологий. Intel, Hewlett-Packard и IBM в течение последних пяти лет создают чипы с повышенной оптической функциональностью, которые работают на гигагерцовых скоростях, что в тысячу раз меньше, чем у VO_2 -коммутатора.

Авторы весьма признательны к.ф.-м.н. В. Д. Анцыгину за внимание к работе и ценные замечания.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания № АААА-А17-117052410034-6 в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roach W. R., Balberg I. // Solid State Commun. 1971. Vol. 9. P. 551.
2. Бугаев А. А., Гудялис В. В., Захарченя Б. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. № 8. С. 452.
3. Cavalleri A., Toth C., Siders C. W., et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 237.
4. Kim H. T., Lee Y. W., Kim B. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. P. 266.

5. Hada M., Okimura K., Matsuo J. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 153.
6. Becker M. F., Buckman A. B., Walsler R. M., et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. P. 1507.
7. Cavalleri A., Dekorsy T., Chong et al. // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. P.161.
8. Lysenko S., Rua A., Vikhnin V., et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. P. 035.
9. Шадрин Е. Б., Ильинский А. В. // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 6. С. 1092.
10. Никулин Е. И., Чудновский Ф. А., Шадрин Е. Б., Мясников Д. А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 12. С. 2411.
11. Stefanovich G., Pergament A., Stefanovich D. // J. Phys. Condens. Matter. 2000. Vol. 12. P. 8837.
12. Leroy J., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 337.
13. Zheng Yang, Changhyun Ko, Shriram Ramnathan // Annual Review of Materials Research. 2011. Vol. 41. P. 337.
14. Lysenko S., Rua A., Vikhnin V., Fernandez F., Liu H. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. P. 104.
15. Семенов А. Л. // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 11. С. 2053.
16. Kubler C., Ehrke H., Huber R., Lopez R., Halabica A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 116.
17. Nakajima M., Takubo N., Hiroi Z., Ueda Y., Suemoto T. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 011.
18. Grinolds M. S., Lobastov V. A., Weissenrieder J., Zewail A. H. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2006. Vol. 103. P. 1842.
19. Lobastov V. A., Weissenrieder J., Tang J., Zewail A. H. // Nano Lett. 2007. Vol. 7. P. 2552.
20. Baum P., Yang D. S., Zewail A. H. // Science. 2007. Vol. 318. P. 788.
21. Wegkamp D., Stähler J. // Prog. Surf. Sci. 2015. Vol. 90. P. 464.
22. Vidas L. The insulator-metal phase transition in VO₂ measured at nanometer length scales and femtosecond time scales – Institut de Ciències Fotòniques. Barcelona. February, 2019.
23. Emelyanov V. I., Babak D. V. // Laser Phys. 1997. Vol. 7. No. 2. P. 514.

PACS: 42.70 Pz, 42.65 Nq, 85.60-q

Experimental dynamics of the super-fast photoinduction phase transition on vanadium dioxide

I. S. Gibin^{1,2} and P. E. Kotlyar¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science
1 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia

Received November 1, 2019

Consideration is given to vanadium dioxide, in which phase transition is performed within the most “technological” temperature +67 °C, the change of resistivity constant is about five degrees, the refraction index changes ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) from 2.5 to 2.0 and switch time is record-short. It is considered to be the most productive material for the modern optoelectronics. The article observes key experiments in the research of dynamics of super-fast reversible phase transition metal-dielectric in vanadium dioxide that has record-short switch time (10 fs). This property of vanadium dioxide can be used to create unique optical shutters that are sure to find use in researches of high-rate processes, in the work out of optical telecommunication systems and in various spheres of optoelectronics and photonics.

Keywords: vanadium dioxide, phase transition, film, metal, dielectric, super-fast, crystal structure.

REFERENCES

1. W. R. Roach and I. Balberg, *Solid State Commun.* **9**, 551 (1971).
2. A. A. Bougaev, V. V. Gudialis, B. P. Zakharechnaya, and Co, *Letters to JTEP* **34** (8), 452 (1981).
3. A. Cavalleri, C. Toth, C. W. Siders, et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 237401 (2001).
4. H. T. Kim, Y. W. Lee, B. J. Kim, et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 266401 (2006).
5. M. Hada, K. Okimura, and J. Matsuo, *Phys. Rev. B* **82**, 153401 (2010).
6. M. F. Becker, A. B. Buckman, R. M. Walser, et al., *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1507–9 (1994).
7. A. Cavalleri, T. Dekorsy, Chong et al., *Phys. Rev. B* **70**, 161102 (2004).
8. S. Lysenko, A. Rua, V. Vikhnin, et al., *Phys. Rev. B* **76**, 035104 (2007).
9. E. B. Shadrin and A. V. Ilinsky, *Physics of hard body*, **42** (6), 1092 (2000).
10. E. I. Nikulin, F. A. Chudnovsky, E. B. Shadrin, and D. A. Masnickov, *JTP* **58** (12), 2411 (1988).
11. G. Stefanovich, A. Pergament, and D. Stefanovich, *J. Phys. Condens. Matter* **12**, 8837–45 (2000).
12. J. Leroy, et al., *Appl. Phys. Lett.* **100**, 337 (2012).
13. Zheng Yang, Changyun Ko, and Shriram Ramanathan, *Annual Review of Materials Research*, **41**, 337 (2011).
14. S. Lysenko, A. Rua, V. Vikhnin, F. Fernandez, and H. Liu, *Phys. Rev. B* **76**, 035104 (2007).
15. A. L. Semenov, *Physics of hard body*, **47** (11), 2053 (2005).
16. C. Kubler, H. Ehrke, R. Huber, R. Lopez, A. Halabica, et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 116401 (2007).
17. M. Nakajima, N. Takubo, Z. Hiroi, Y. Ueda, and T. Suemoto, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 011907 (2008).
18. M. S. Grinolds, V. A. Lobastov, J. Weissenrieder, and A. H. Zewail, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **103**, 18427–31 (2006).
19. V. A. Lobastov, J. Weissenrieder, J. Tang, and A. H. Zewail, *Nano Lett.* **7**, 2552–58 (2007).
20. P. Baum, D. S. Yang, and A. H. Zewail, *Science* **318**, 788–92 (2007).
21. D. Wegkamp and J. Stähler, *Prog. Surf. Sci.* **90**, 464 (2015).
22. L. Vidas, *The insulator-metal phase transition in VO₂ measured at nanometer length scales and femtosecond time scales* (Institut de Ciències Fotòniques, Barcelona, February, 2019).
23. V. I. Emelyanov and D. V. Babak, *Laser Phys.* **7** (2), 514 (1997).