

05; 07

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК—МЕТАЛЛ В ДВУОКСИ ВАНАДИЯ ДЛЯ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂ ЛАЗЕРА

*Н. Ф. Бочоришвили, В. Д. Введенский, Ю. М. Гербштейн, О. Б. Данилов,
В. А. Климов, Н. Ю. Сенцов, Ф. А. Чудновский, Е. Б. Шадрин*

Рассмотрены возможности использования фазового перехода полупроводник—металл в двуокиси ванадия для создания лазерного зеркала с электронно-лучевой адресацией. Сконструировано многослойное зеркало с перепадом коэффициента отражения на длине волны 10,6 мкм от 0,14 до 0,92 для полупроводникового и металлического состояний пленки двуокиси ванадия соответственно. Оно было установлено в резонатор CO₂ лазера, и импульсный локальный разогрев зеркала электронным лучом приводил к генерации лазерных импульсов длительностью ~1 мс.

Фазовый переход полупроводник—металл происходит в двуокиси ванадия при 340 К и сопровождается резкой перестройкой электронной и фононной подсистем, что вызывает значительные изменения электрических и оптических свойств. Такие изменения определяют использование двуокиси ванадия в технике для записи и обработки оптической информации [1], при конструировании устройств защиты радиоаппаратуры от термических нагрузок [2], для управления лазерным излучением.

Создание управляемых лазерных зеркал, где в качестве одного из слоев интерференционной структуры используется VO₂, выдвигает, помимо чисто технических, ряд интересных физических проблем. К ним можно отнести проблему сочетания покрытий из двуокиси ванадия с традиционными полупроводниковыми материалами (такими, как германий, кремний, сульфиды кадмия и цинка и др.), которые оказывают влияние на параметры фазового перехода.

Другой проблемой, представляющей самостоятельный интерес, является изучение влияния электронного облучения на фазовый переход полупроводник—металл.

Переход в металлическое состояние в двуокиси ванадия можно инициировать не только нагревом образца, но и легируя материал донорами Nb, W, F [2], инжектируя протоны [3], создавая отклонение от стехиометрии по кислороду ионным [4] или электронным [5, 6] облучением. Последние способы «металлизации» открывают интересные возможности «оперативного» легирования двуокиси ванадия для создания пространственно неоднородных структур с чередующимися полупроводниковыми и металлическими областями.

С другой стороны, явление ухода кислорода из пленки двуокиси ванадия под действием управляющего электронного пучка приводит к деградации покрытия и выдвигает проблему поиска эффективной защиты.

В настоящей работе обсуждается ряд физических проблем, которые приходится решать при изготовлении управляемого VO₂ зеркала, и подробнее рассматривается принцип работы многослойного управляемого VO₂ зеркала.

Принципиальная возможность использования фазового перехода полупроводник—металл в двуокиси ванадия для внутрирезонаторного управления

излучением CO_2 лазера продемонстрирована в работах [7-9]. Она основана на том, что при фазовом переходе коэффициент отражения VO_2 меняется от $R \approx 0.4$ в полупроводниковом состоянии (ниже 340 К) до $R \approx 0.85$ в металлическом состоянии (выше 340 К). Такой скачок использован в [7] для создания управляемого лазерного зеркала, которое представляет собой по существу пленку VO_2 и устанавливается вместо «глухого» зеркала в резонатор CO_2 лазера. В исходном состоянии VO_2 зеркало имеет достаточно низкий коэффициент отражения, и генерация отсутствует. Переключение VO_2 зеркала в состояние с высоким коэффициентом отражения осуществляется в отдельной «точке» (0.3×0.3 мм) поверхности зеркала нагреванием сфокусированным электронным лучом и приводит к возникновению генерации. При использовании сопряженного резонатора в CO_2 лазере сканирование электронного луча по поверхности VO_2 зеркала приводит к переключению пространственных мод и сканированию лазерного луча.

Однако использование в качестве управляемого зеркала обычных пленок VO_2 осложняется рядом обстоятельств. Во-первых, коэффициент отражения VO_2 в металлическом состоянии недостаточно высок (85 %), использование его в качестве «глухого» зеркала не обеспечивает оптимального режима работы лазера. Кроме того, следствием низкого коэффициента отражения может стать «тепловой захват», который заключается в том, что энергии излучения, поглощаемого зеркалом в режиме генерации, оказывается достаточно для удержания пленки VO_2 в нагретом состоянии без участия электронного луча. Зеркало, таким образом, теряет управление. Во-вторых, коэффициент отражения VO_2 в полупроводниковом состоянии недостаточно мал, что может приводить к самовозбуждению лазера и неуправляемой генерации. В-третьих, непосредственная бомбардировка открытой поверхности пленки VO_2 электронами в вакууме вызывает деградацию последней, т. е. необратимые изменения, величина которых пропорциональна дозе облучения и сложным образом связана с энергией электронов. При этом наблюдаются уменьшение перепада коэффициента отражения между полупроводниковым и металлическим состояниями, сдвиг температуры фазового перехода в область меньших значений, уширение петли гистерезиса и сильное уменьшение крутизны температурной зависимости коэффициента отражения в области фазового перехода. Все это приводит к резкому ухудшению эксплуатационных характеристик лазерного зеркала.

На начальной стадии деградации в пленке VO_2 накапливаются радиационные дефекты, связанные с потерей кислорода. Это подтверждается тем обстоятельством, что облученные образцы способны частично восстанавливать свои свойства при достаточно долгом соприкосновении с кислородом воздуха. Деградация пленки VO_2 под воздействием электронного луча не приводит к образованию металла в общепринятом смысле этого слова [8]. Можно также отметить, что для обработанных электронным лучом пленок VO_2 характерно отрицательное магнитосопротивление при гелиевых температурах [8].

Явление деградации пленки VO_2 под воздействием электронного луча требует, таким образом, создания защиты лазерного зеркала путем нанесения специального покрытия. Такое покрытие должно удовлетворять следующим требованиям. Во-первых, оно должно быть прозрачно на рабочей длине волны, толщина его должна быть такова, чтобы тепловыделение происходило главным образом вблизи рабочего слоя VO_2 . Во-вторых, оно должно иметь минимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии при используемых нами энергиях электронов (12—15 кэВ), т. е. как можно меньший второй критический потенциал [10]. В-третьих, оно должно иметь достаточно высокую проводимость, чтобы обеспечить эффективный сток заряда с целью предотвращения сквозных токов через пленку VO_2 . В-четвертых, оно должно иметь хорошую адгезию к окислам ванадия, близкий к ним коэффициент теплового расширения и одновременно с этим слабо выраженные восстановительные свойства для исключения кислородного обмена внутри покрытия. И, наконец, в-пятых, само покрытие должно быть радиационно стойким, причем желательно, чтобы оно обладало определенными катодолюминисцентными свойствами, что существенно облегчило бы совмещение оптического и электронно-лучевого зрачков системы, т. е. юстировку резонатора лазера.

Несмотря на то что в [8, 9] сообщено о работе CO₂ лазера с электронно-управляемым VO₂ зеркалом, конструкция самого многослойного зеркала не приведена и поведение его исследовано явно недостаточно. Созданное в настоящей работе зеркало представляло собой многослойный, эффективно пропускающий интерференционный фильтр, который при переходе пленки VO₂ в металлическое состояние переключается в интерференционное зеркало с высоким коэффициентом отражения. Работу такого зеркала поясним на примере интерферометра Фабри—Перо (рис. 1), у которого посредине между зеркалами 1 и 2 расположена тонкая (по сравнению с длиной волны света) пленка VO₂ (3). Пусть на интерферометр падает параллельный пучок света с длиной волны λ . Пленка VO₂ при температурах ниже 340 К прозрачна, длина резонатора определяется расстоянием между зеркалами d (речь идет об оптической длине, т. е. о величине nd , где n — показатель преломления среды между зеркалами). Если $d = \lambda/2$,

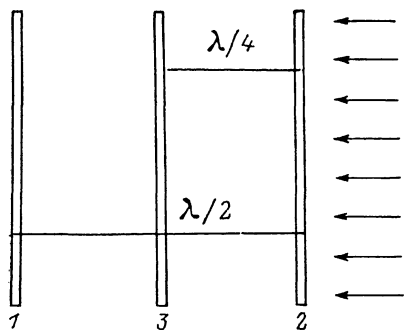


Рис. 1.

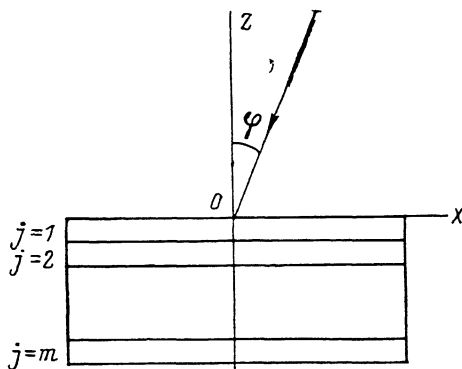


Рис. 2. Геометрия многослойного VO₂ зеркала.

то интерферометр настроен на «пропускание» (пропускание $T \approx 1$, а коэффициент отражения $R \approx 0$). При нагревании выше 340 К пленка VO₂ претерпевает фазовый переход в металлическое состояние — превращается в металлическое зеркало. В результате длина резонатора уменьшается до $\lambda/4$ и интерферометр перестраивается на «отражение» ($T \approx 0$, а $R \approx 1$).

Аналитически работу многослойного зеркала с VO₂ слоем (рис. 2) описывали с помощью решений системы уравнений Максвелла

$$E_x^{(j)} = \xi'_j e^{-ix_j \frac{\omega}{c} z} + \xi_1 e^{ix_j \frac{\omega}{c} z},$$

$$E_z^{(j)} = \frac{x_x}{x_j} \left\{ \xi'_j e^{-ix_j \frac{\omega}{c} z} - \xi_1 e^{ix_j \frac{\omega}{c} z} \right\},$$

где $x_x = \sqrt{\varepsilon_1} \sin \varphi$, $x_j = \sqrt{\varepsilon_j - x_x^2}$, φ — угол падения света; ω — частота света; ε_j — диэлектрическая проницаемость j -й среды ($j=1, 2, \dots, m$); ξ_j , ξ'_j — проекции на ось X вектора электрического поля в отраженной и падающей волнах.

С помощью обычных в электродинамике граничных условий

$$E_x^{(j)} = E_x^{(j+1)}; \quad \varepsilon_j E_z^{(j)} = \varepsilon_{j+1} E_z^{(j+1)}$$

получали систему $2m$ линейных уравнений, решая которую находили выражение для R . Проанализированы многослойные системы с $m \leq 10$.

В качестве примера на рис. 3 представлены спектры отражения одного из многослойных зеркал для металлического (кривая 1) и полупроводникового (кривая 2) состояний пленки VO₂. Видно, что на длине волны 10.6 мкм коэффициенты отражения зеркала равны 0.92 для металлического и 0.14 для полупроводникового состояний VO₂. На этом же рисунке штриховыми кривыми приведены рассчитанные спектры, которые неплохо согласуются с экспериментом.

Многослойное VO₂ зеркало было установлено в качестве экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), причем ось электронной пушки составляла 30° с нор-

малью к поверхности зеркала. Путем непрерывной безмасляной откачки в ЭЛТ поддерживался вакуум 10^{-5} мм рт. ст. Сменный оксидный катод обеспечивал токи электронного луча до 0.2—0.3 мА при напряжениях на аноде ЭЛТ 12—15 кВ. Средняя длина пробега электронов при этих условиях в материале зеркала близка к толщине покрытий, расположенных над слоем VO_2 . Таким образом, основная доля тепла, выделяющегося при торможении электронов, прихо-

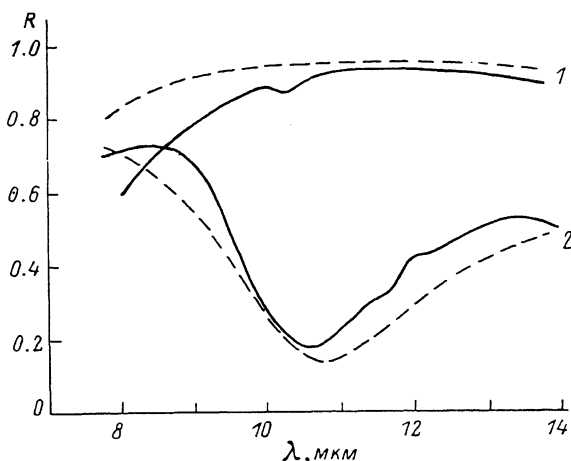


Рис. 3. Экспериментальный (сплошная кривая) и рассчитанный (штриховая кривая) спектры отражения многослойного VO_2 зеркала.

дится на слои, примыкающие к пленке VO_2 . Кроме того, отраженная и вторичная компоненты тока при этих условиях невелики [10, 11]. Использованы электромагнитные системы фокусировки и коммутации электронного луча по рабочему полю зеркала, имеющего площадь ~ 10 см². Диаметр луча в плоскости зеркала при рабочих условиях равнялся 0.3—0.5 мм. Температура VO_2 зеркала поддерживалась вблизи температуры фазового перехода и составляла ~ 330 К.

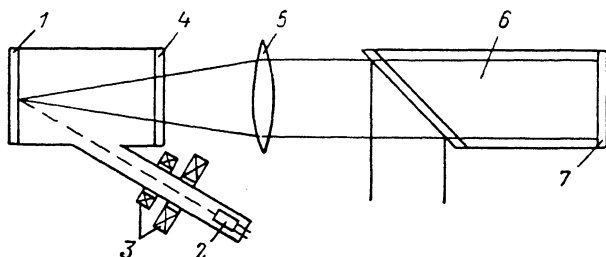


Рис. 4. Схема включения VO_2 зеркала в резонатор CO_2 лазера.

1 — VO_2 зеркало, 2 — электронная пушка, 3 — системы коммутации и фокусировки электронного луча, 4 — германиевое окно, 5 — германиевая линза, 6 — трубка с рабочей газовой смесью, 7 — «глухое» лазерное зеркало.

Для импульсного локального разогрева зеркала на катод запертой ЭЛТ подавались отпирающие импульсы прямоугольной формы.

Управляемое VO_2 зеркало было установлено в резонатор CO_2 лазера, содержащий германиевую линзу с фокусным расстоянием 50 см, и после юстировки можно было наблюдать инициированные электронным лучом лазерные импульсы. Схема установки приведена на рис. 4. За возникновением генерации следили по отражению от окна трубки с рабочей газовой смесью, а в качестве приемника излучения использовали фотосопротивление Cd-Hg-Te , охлаждаемое жидким азотом. Длительность и частота следования импульсов излучения с $\lambda = 10.6$ мкм задавались длительностью и частотой отпирающих импульсов, подаваемых на катод ЭЛТ. Испытания зеркала по схеме, приведенной на рис. 4,

показали, что при длительности импульсов ~ 1 мс и при отсутствии «теплого захвата» деградации зеркала не наблюдается после 10^5 — 10^6 импульсов.

В заключение авторы выражают признательность Б. П. Захарчене за постоянный интерес к работе.

Список литературы

- [1] Захарченя Б. П., Мешковский И. О., Теруков Е. И., Чудновский Ф. А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. Вып. 1. С. 9—11.
- [2] Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл—полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 184 с.
- [3] Гаврилюк А. И., Ланская Т. Г., Мансуров А. А., Чудновский Ф. А. // ФТТ. 1984. Т. 26. Вып. 1. С. 200—206.
- [4] Аброян И. А., Величко В. Я., Подсвилов О. А., Чудновский Ф. А. // Тр. ЛПИ. 1980. № 3171. С. 69—71.
- [5] Аброян И. А., Величко В. Я., Подсвилов О. А., Чудновский Ф. А. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 3. С. 775—779.
- [6] Никулин Е. И., Мясников Д. А., Чудновский Ф. А., Шадрин Е. Б. // ЖТФ. Т. 58. Вып. 12. С. 2411—2413.
- [7] Chivian Jay S., Case W. E., Rester D. H. // IEEE Quantum Electron. 1979. Vol. QE-15. N 12. P. 1326—1328.
- [8] Welch A. B., Burzlaff B., Cunningham W. // SPIE «Physics and technology of coherent infrared radar». 1981. Vol. 300. P. 432—441.
- [9] Chivian Jay S., Scott M. W., Case W. E., Krasutsky N. J. // IEEE Quantum Electron. 1985. Vol. QE-21. N 4. P. 383—390.
- [10] Шультман А. Р., Фридрихов С. В. Вторично-эмиссионные методы исследования твердых тел. М.: Наука, 1977. 551 с.
- [11] Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторично-электронная эмиссия. М.: Мир, 1972. 407 с.

Ленинградский
физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР

Поступило в Редакцию
12 июля 1988 г.