

06.3;07;12

©1995

ЭФФЕКТ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМНОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ ПРИ ЕГО ЛЕГИРОВАНИИ МЕДЬЮ

В.М.Шандаров

Легирование ниобата лития железом приводит к значительному возрастанию его темновой проводимости. Это наблюдалось как для кристаллов, допированных Fe в процессе выращивания [1], так и для оптических волноводных структур $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$, $\text{LiNbO}_3 \text{Ti} : \text{Fe}$ [2,3], полученных высокотемпературной диффузией Fe и Ti. Изменение темновой проводимости в зависимости от концентрации Fe дает возможность варьирования времени хранения фоторефрактивных голографических решеток в подобных кристаллах и волноводных элементах от месяцев до долей секунды. Такой эффект представляет наибольший интерес для динамической голографии, и в особенности это относится к оптическим волноводам, допускающим локальное, в том числе совместное, легирование поверхности различными примесями. Влияние некоторых примесей на фоторефрактивные характеристики LiNbO_3 изучалось достаточно детально в работах [2,4-7], однако эффекты, связанные с их одновременным присутствием в данном кристалле, изучены недостаточно.

В данной работе при исследовании релаксации фоторефрактивных голографических решеток в оптических волноводах $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$, дополнительно легированных медью, впервые наблюдался эффект значительного уменьшения темновой проводимости в волноводной области.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Использовался He-Ne лазер ($\lambda = 0.63$ мкм) с мощностью ~ 1.5 мВт и двухлучевая схема записи решеток. Угол схождения лучей в волноводе составлял $\sim 3.2^\circ$, что соответствовало периоду решетки 5.2 мкм. Ввод света в волновод и его вывод осуществлялись с помощью призмных элементов из ниобата лития. Оптические волноводы формировались в подложках LiNbO_3 Y-среза диффузией Fe в атмосфере воздуха при температуре $T = 950^\circ\text{C}$. Начальная толщина пленок Fe составляла 30.0-40.0 нм, а время диффузии изменялось для разных образцов от 5 до 20 ч. Затем локальные области волноводов легировались медью также в атмосфере воздуха при $T = 900^\circ\text{C}$. В исследованиях использовались два метода. Первый включал постоянное считывание предвари-

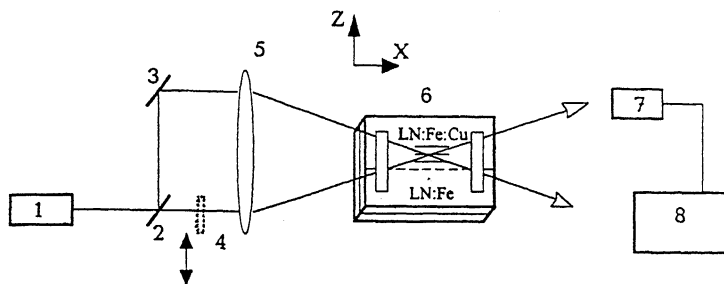


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер; 2, 3 — полупрозрачное и глухое зеркала; 4 — механическая шторка; 5 — фокусирующая линза ($F = 35$ см); 6 — оптический волновод; 7 — фотоприемник; 8 — самописец.

тельно сформированной решетки одним из записывающих лучей с изменением его интенсивности в разных экспериментах. Второй — периодическое считывание с включением светового луча на время в доли секунды. Таким образом, предполагалось оценить вклад фотопроводимости в процесс релаксации решеток. Временные зависимости интенсивности дифрагированного на решетке луча изучались и регистрировались с помощью фотодиода ФД 24К и самописца НЗ030.

Основная часть исследований выполнена на волноводном образце, для которого время релаксации решеток, записываемых в области $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ при взаимодействии волноводных мод TE_0-TE_0 , TE_1-TE_1 , TE_2-TE_2 , изменялось от ~ 3 до ~ 30 с. Соответствующие экспериментальные зависимости интенсивности дифрагированного луча при постоянном считывании приведены на рис. 2, а. Вследствие неоднородности полей волноводных мод и концентрации Fe по толщине волновода только зависимость 1 для релаксации решетки, формируемой TE_0 модами, достаточно хорошо аппроксимируется обычной экспонентой

$$I(t) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (1)$$

Здесь τ — некоторое усредненное время максвелловской релаксации в области локализации поля данной моды. Соответствующая средняя величина проводимости в этой области может быть оценена из известного соотношения

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\tau}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = 2.6 \cdot 10^{-12}$ Ф/см — диэлектрическая проницаемость кристалла. В нашем случае для $\tau \approx 3.5$ с $\sigma \approx 0.74 \times 10^{-12}$ (Ом·см) $^{-1}$. На рис. 2, б представлены аналогичные

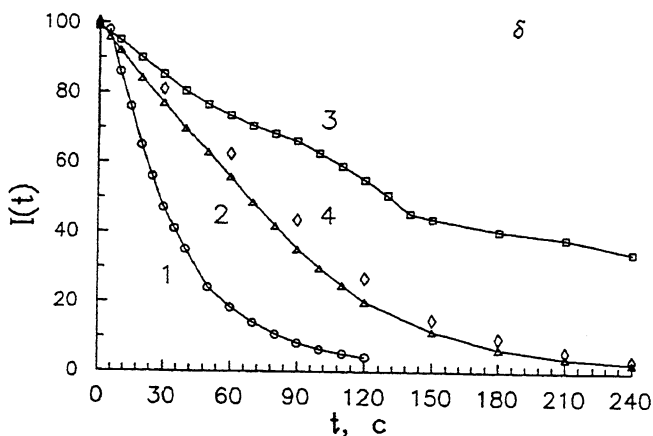
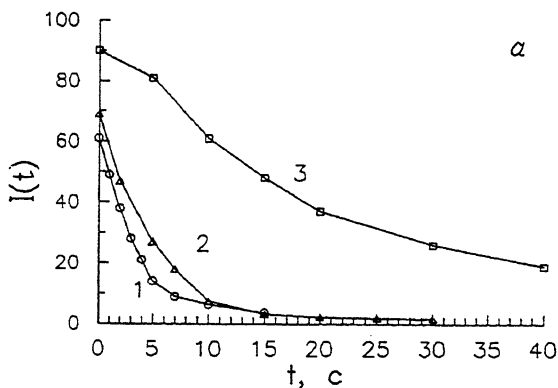


Рис. 2. Временные зависимости интенсивности дифрагированного луча при релаксации фоторефрактивных решеток, записанных в волноводах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (а) и $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Cu}$ (б) модами: 1 — TE_0 ; 2 — TE_1 ; 3 — TE_2 ; 4 — TE_1 мода, время считывания — 0.5 с, период — 30 с.

зависимости для участка $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Cu}$ того же образца. Здесь время релаксации решетки для TE_0 моды составляет ~ 35 с, т. е. на порядок больше, чем для $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Для мод более высокого порядка в обеих частях волновода временные зависимости не допускают такой простой аппроксимации. Тем не менее данные зависимости для TE_1 , TE_2 мод в области $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Cu}$ также имеют существенно больший временной масштаб.

Наблюдаемый эффект значительного увеличения времени релаксации фоторефрактивных решеток свидетельствует об уменьшении проводимости кристалла и не может быть

обусловлен различием распределений полей TE мод в областях с присутствием Cu и без нее. Такие поля для одинаковых мод данного волновода, восстановленные по спектрам эффективных показателей преломления, совпадают практически с геометрической точностью, поскольку диффузия Cu приводит лишь к незначительному уменьшению необыкновенного показателя преломления ниобата лития [8]. В данном образце вклад Cu в волноводный эффект составлял лишь около 9% от вклада Fe . Точность восстановления профилей показателей преломления и полей TE мод достаточно высока, поскольку волновод поддерживал в направлении X $8TE$ мод в той и другой областях. Возможность вклада в обнаруженный эффект дырочного механизма фотопроводимости в области с Cu также должна быть исключена, так как по данным [5] этот механизм может проявляться в $LiNbO_3 : Cu$ в ближней ультрафиолетовой области, но не для $\lambda = 0.63$ мкм. Кроме того, в экспериментах не обнаружено существенного вклада фотопроводимости в процесс релаксации решеток при используемых интенсивностях света. Это иллюстрируется близостью зависимостей 2 и 4 на рис. 2, б; соответствующих режимам постоянного и периодического считывания решетки (время считывания составляло 0.5 с при периоде в 30 с). Изменение интенсивности считывающего луча также не приводило к видимому изменению времени релаксации решеток.

Наблюдаемый эффект может быть объяснен следующим. При диффузии ионы Cu занимают в кристаллической решетке позиции преимущественно вблизи дефектов, обусловленных присутствием ионов Fe . При этом ионы Fe стабилизируются в валентном состоянии Fe^{3+} (возможно, за счет прыжковых переходов электронов с примесных центров Fe^{2+} на ловушки, образованные ионами Cu), которое не дает вклада в темновую проводимость кристалла. Таким образом, при одинаковой концентрации Fe в волноводах $LiNbO_3 : Fe : Cu$ и $LiNbO_3 : Fe$ число донорных центров Fe^{2+} в первом из них может оказаться значительно меньшим, чем во втором, а термическая генерация электронов с этих центров считается ответственной за темновую проводимость $LiNbO_3$. Хотя более детальное выяснение механизма данного эффекта требует проведения дополнительных, в том числе неоптических, исследований, его использование уже сейчас представляет широкие возможности для управления динамическими характеристиками фоторефрактивных решеток в оптических волноводах на основе $LiNbO_3$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 93-02-14994) и Международного научного фонда (грант RI5000).

Список литературы

- [1] Баркан И.Б., Воробьев А.В., Маренников С.И. // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. С. 833-835.
- [2] Kip D., Kraetzig E. // Opt. Lett. 1992. V. 17. P. 1563-1565.
- [3] Шандаров В.М., Шандаров С.М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 48-51.
- [4] Sommerfeldt R., Holtman L., Kraetzig E., Crabmaier B. // Ferroelectrics. 1989. V. 92. P. 219-225.
- [5] Kraetzig E., Orlowsky R. // Opt. and Quant. electron. 1980. V. 12. P. 495-498.
- [6] Пашков В.А., Соловьева Н.М., Уюкин Е.М. // ФТТ. 1979. Т. 21. С. 1879-1882.
- [7] Куликов В.В., Степанов С.И. // ФТТ. 1979. Т. 21. С. 3204.
- [8] Попов В.Л., Шандаров В.М. // ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 88-92.

Томская государственная
академия систем управления
и радиоэлектроники

Поступило в Редакцию
10 января 1995 г.
