

ОБ ОДНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКИ БИСТАБИЛЬНОЙ СХЕМЕ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© С.В.Поляков, В.А.Трофимов

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 26 января 1996 г.)

В последнее время широко исследуется проблема использования различных оптических бистабильных (ОБ) полупроводниковых устройств в качестве элементов оптических компьютеров [1]. Особый интерес представляют плоские интегральные ОБ схемы [2]. В настоящей работе (см. также [3]) предлагается новая интегральная схема на основе полупроводниковых абсорбционных ОБ элементов, позволяющая значительно улучшить характеристики переключения (быстродействие, низкие пороги переключения), а также уменьшить их размеры. Основная идея состоит в том, чтобы использовать выходной пучок для дополнительной накачки бистабильной среды. Для этого нелинейно поглощающий полупроводниковый кристалл помещается в систему зеркал, как показано на рис. 1. За счет первого зеркала с коэффициентом отражения R_0 осуществляется частичный или полный отвод выходного пучка I_1 обратно в нелинейную среду. Величина коэффициента R_0 , сечение z_0 входа бокового пучка I_R и местоположения считывающего фотоэлемента являются параметрами схемы.

Численное моделирование процессов переключения в предложенной ОБ схеме проводилось нами для абсорбционного элемента с примесной электронной проводимостью, бистабильность в котором обусловлена ростом коэффициента поглощения с концентрацией фотовозбужденных носителей заряда. Процессы переключения в таком элементе в простейшем случае описываются уравнением для интенсивности светового пучка I в нелинейной среде

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\delta_0 \delta(n)I, \quad 0 < z < 1, \quad t > 0, \quad (1)$$

с граничным условием

$$I|_{z=0} = I_0(t) \quad (2)$$

и уравнением для концентрации неравновесных носителей заряда n

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \delta(n)I - n + Q, \quad 0 < z < 1, \quad t > 0 \quad (3)$$

с начальным условием

$$n|_{t=0} = 0, \quad I_0|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

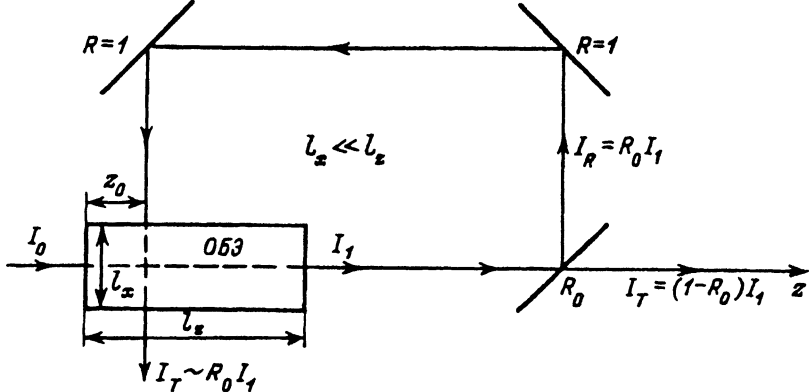


Рис. 1. Интегральная схема с абсорбционным ОБ элементом.

Здесь безразмерная интенсивность

$$I = \frac{\bar{I} \delta_m \tau_p}{\hbar \omega (N_D - N_A)},$$

где \bar{I} — ее размерное значение, δ_m — максимальное значение коэффициента поглощения, τ_p — время жизни неравновесных носителей заряда, $\hbar \omega$ — энергия поглощаемых квантов света, N_D и N_A — концентрации доноров и акцепторов; δ_0 — произведение длины кристалла L на δ_m , $\delta(n)$ — безразмерная зависимость коэффициента поглощения от концентрации носителей n , координата z нормирована на длину кристалла l , время t — на время τ_p , концентрация n измеряется в единицах $N_D - N_A$, Q — описывает влияние бокового пучка.

$$Q = \delta(n) I_1 R_0 (1 - e^{-t/\tau_d}) e^{-|z-z_0|/a}, \quad (5)$$

где τ_d — характерное время прохождения ответвленного пучка по системе зеркал, параметр a учитывает конечную ширину пучка.

При численном моделировании процессов переключения зависимость коэффициента поглощения $\delta(n)$ бралась нами в виде

$$\delta(n) = (1 - n)(\delta_1 + \delta_2 s(n)), \quad s(n) = \begin{cases} 0 & \text{для } n \leq n_0, \\ \sqrt{n - n_0} & \text{для } n > n_0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\delta_{1,2}$ — весовые коэффициенты; n_0 — критическая концентрация неравновесных носителей заряда, при превышении которой начинается взрывное поглощение световой энергии.

Данная аппроксимация достаточно близка к зависимости, приведенной в [4] для CdS.

Временная зависимость падающей интенсивности рассчитывалась по формуле

$$I_0(t) = I_m (1 - e^{-t/\tau_0}), \quad (7)$$

где I_m — максимальное значение $I_0(t)$; τ_0 — параметр, характеризующий время выхода $I_0(t)$ на максимум I_m .

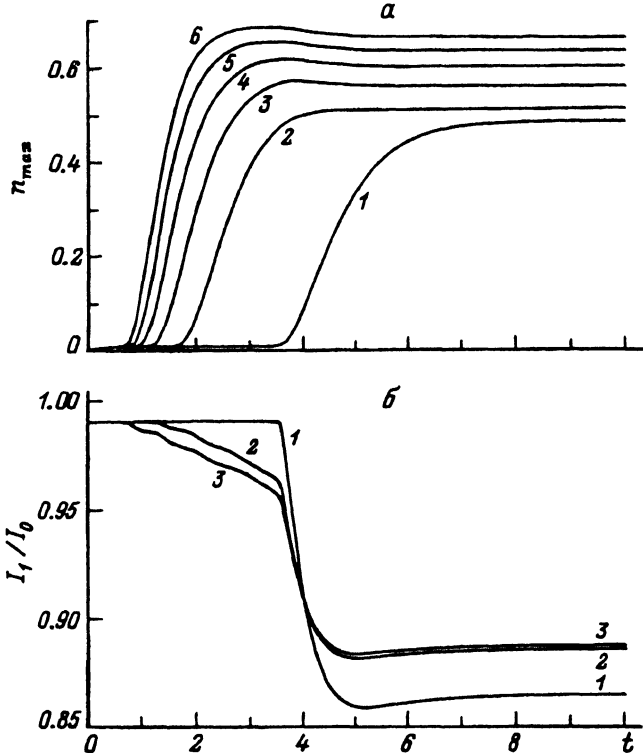


Рис. 2. Временные зависимости максимума концентрации носителей заряда n_{max} (а) и отношения выходной интенсивности к входной $\bar{I}_1 = I_1/I_0$ (б) при $I_M = 0.52$, $z_0 = 0.205$ для различных значений коэффициента отражения. а — $R_0 = 0$ (1), 0.2 (2), 0.4 (3), 0.6 (4), 0.8 (5), 1 (6); б — $R_0 = 0$ (1), 0.4 (2), 1 (3).

В данной работе исследовался случай, когда сильный рост поглощения и связанная с ним бистабильность реализуются при небольшой концентрации носителей заряда n , т.е. вдали от насыщения зависимости $\delta(n)$. Для этого мы взяли $n_0 = 0.01$. Другие параметры были равны $\delta_0 = 0.5$, $\delta_1 = 0.02$, $\delta_2 \approx 2.6$, $\tau_d = 0.01$, $a = 0.01$, $\tau_0 = 0.01$.

В рассматриваемом случае в классической ОБ схеме, т.е. в отсутствие бокового пучка ($R_0 = 0$), два устойчивых состояния элемента реализуются при $I_M > 0.5$. Для примера было выбрано значение $I_M = 0.52$, при котором переключение образца из нижнего состояния в верхнее происходит на длине $z_n \approx 0.3$ за время $t_1 \approx 3.8$ (для удобства здесь и ниже приводятся времена переключения концентрации n). Сравним эту ситуацию со случаем, когда коэффициент отражения $R_0 > 0$.

Расчеты показывают, что в присутствии бокового пучка скорость переключения возрастает и определяется значением коэффициента отражения. А именно переключение происходит тем быстрее, чем больше энергии отводится обратно в нелинейную среду, т.е. чем больше коэффициент R_0 . Для выбранных параметров с ростом R_0 время переключения образца вверх уменьшается до значения ≈ 0.75 при $R_0 = 1$, что в 4.5 раза ниже, чем в классической схеме. Фактически данный эффект соответствует увеличению падающей интенсивности, однако дополнительной энергии при этом не требуется. Отметим также, что

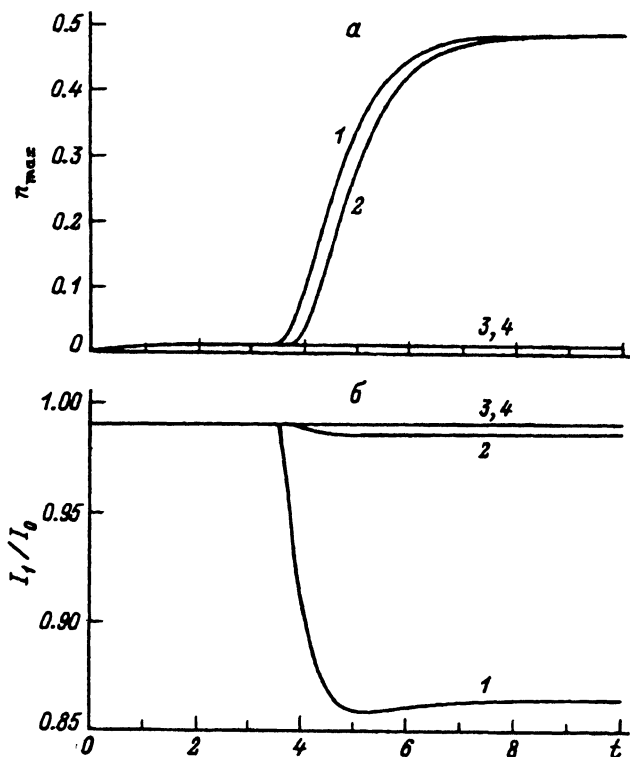


Рис. 3. Временные зависимости n_{\max} (а) и \bar{I}_1 (б) для $z_0 = 0.205$ при наличии (1, 2) и отсутствии (3, 4) переключения.

$R_0 = 0$ (1, 3), 1 (2, 4); $I_m = 0.52$ (1), 0.26 (2), 0.50 (3), 0.25 (4).

скорость переключения слабо зависит от сечения входа z_0 бокового пучка, а общее поглощение энергии образцом уменьшается.

Иллюстрацией сказанного служит рис. 2, где показаны временные зависимости максимума концентрации n_{\max} и отношения выходной интенсивности к входной $\bar{I}_1 = I_1/I_0$. При их анализе следует учесть, что верхняя ветвь концентрации лежит выше значения $n \approx 0.03$ и достижение концентрацией этого значения свидетельствует о переключении. Заметим, что время переключения элемента можно определять и по переключению выходной интенсивности пучка, однако она несколько запаздывает по отношению к концентрации [5].

Из расчетов также следует, что по сравнению с традиционной схемой ($R_0 = 0$) в данном случае вследствие оптимального использования поступающей в среду энергии в несколько раз снижаются пороги переключения образца по интенсивности входного пучка I_0 . Этот факт иллюстрирует рис. 3, где приведены зависимости $n_{\max}(t)$ и $\bar{I}_1(t)$ в случае существования (кривые 1-2) и в случае отсутствия переключения (кривые 3) для $R_0 = 0$ (кривые 1, 3) и $R_0 = 1$ (кривые 2, 3). При этом пороговая интенсивность переключения вверх I_{\uparrow} в предлагаемой интегральной схеме равна ≈ 0.25 , что в 2 раза ниже, чем в схеме без зеркал.

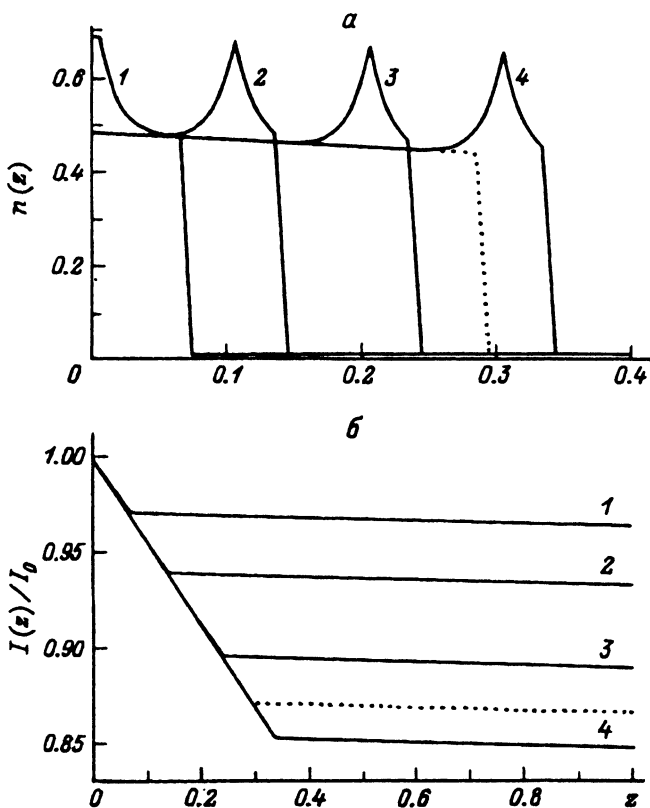


Рис. 4. Стационарные распределения концентрации носителей заряда $n(z)$ (а) и интенсивности в среде $\bar{I} = I/I_0$ (б) при $R_0 = 1$, $I_M = 0.52$ для $z_0 = 0$ (1), 0.105 (2), 0.205 (3), 0.305 (4).

Пунктир — $R_0 = 0$, сплошные кривые — $R_0 > 0$.

Еще одним обнаруженным эффектом является сокращение в несколько раз домена переключения при $z_0 \rightarrow 0$ (рис. 4). Вследствие этого уменьшается поглощаемая энергия светового излучения. Заметим, что данный эффект реализуется тогда, когда бистабильность проявляется вдали от насыщения коэффициента поглощения при зависимости $\delta(n)$. При удалении сечения падения бокового пучка от передней грани кристалла домен поглощения сначала увеличивается, а затем распадается на два. При этом, как уже отмечалось выше, временные характеристики процесса переключения по концентрации почти не изменяются.

Сформулируем теперь основные результаты. Во-первых, в предлагаемой интегральной ОБ схеме в 4–5 раз сокращаются времена переключения по концентрации носителей заряда и в 2 раза снижаются пороги переключения по падающей интенсивности. Во-вторых, обнаруженное в расчетах снижение общего поглощения образцом превышает его устойчивость к флуктуациям. В-третьих, эффект уменьшения зоны переключения позволяет существенно сократить размеры ОБ элементов, что является в настоящее время очень актуальным.

В заключение отметим, что полученные результаты справедливы как для ОБ элементов на основе полупроводников с примесной проводимостью, так и для узкозонных полупроводников с собственной проводимостью, а также для схем, основанных на ОБ элементах с температурной зависимостью коэффициента поглощения.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 95-02-04448-а).

Список литературы

- [1] *Гиббс Х.* Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. М.: Мир, 1988. 520 с.
 - [2] Оптические вычисления / Под ред. Р. Аппатуна. М.: Мир, 1993. 441 с.
 - [3] *Трофимов В.А.* // Квантовая электрон. В печати.
 - [4] *Kosh S.W., Schmidt H.E., Haug H.* // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 45. N 9. P. 932-934.
 - [5] *Карамзин Ю.Н., Поляков С.В., Трофимов В.А.* Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. № 62. М., 1990. 40 с.
-