

07

Удвоение частоты излучения с длиной волны 859.2 nm в волноводе из пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 на подложке из KTiOPO_4

© П.М. Житков, А.Ю. Агапов, В.М. Шевцов

Российский университет дружбы народов, Москва

Поступило в Редакцию 12 июля 1999 г.

Для получения когерентного излучения синей области спектра предложено использовать генерацию второй гармоники (ГВГ) в волноводе из пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 на кристаллической подложке KTiOPO_4 (КТР). Показано, что эффективность ГВГ в тонкопленочном полосковом волноводе может достигать $1010\% \text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, а спектральная ширина фазового синхронизма — $0.45 \text{nm} \cdot \text{cm}$. В эксперименте наблюдалась ГВГ лазерного излучения с длиной волны 859.2 nm в волноводе $\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-КТР}$.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области повышения плотности записи информации на оптических носителях путем использования для записи и считывания коротковолновых источников света. Миниатюрный, надежный и достаточно мощный источник с длиной волны 400–500 nm может быть создан на основе удвоения частоты излучения полупроводникового лазера.

Наибольшую эффективность преобразования частоты излучения полупроводникового лазера можно получить при использовании волноводных нелинейных устройств. Малые поперечные размеры области локализации поля и бездифракционное распространение волн в волноводах обеспечивают таким схемам преимущество в эффективности преобразования по сравнению с традиционной объемной схемой до 10^4 раз [1].

Для уменьшения поперечных размеров области нелинейного взаимодействия следует обеспечить как можно больший перепад показателя преломления в сечении волноводной структуры. При фиксированной мощности источника накачки это позволяет получить максимально возможные значения интенсивностей и таким путем существенно повысить эффективность нелинейного преобразования.

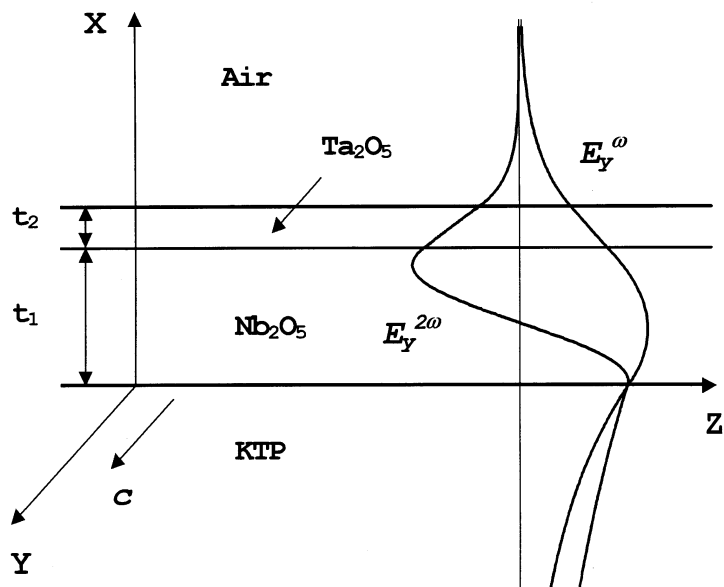


Рис. 1. Волновод из пленок Ta_2O_5 и Nb_2O_5 на подложке из кристалла КТР. Справа показаны распределения полей волн TE_0^ω и $\text{TE}_1^{2\omega}$ в поперечном сечении волноводной структуры.

Большинство работ по ГВГ в оптических волноводах выполнено на основе градиентных структур на подложках из нелинейных кристаллов. Однако из-за особенностей методов получения таких волноводов перепад показателя преломления между приповерхностным несущим слоем и подложкой, как правило, не превышает 0.1, тогда как в тонкопленочных волноводах эта величина может быть более 0.5. Поэтому тонкопленочные оптические волноводные устройства преобразования частоты на нелинейных кристаллических подложках представляются наиболее перспективными.

В настоящей работе рассматривается волноводная структура из пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 на подложке из кристалла КТР, обладающего высокой оптической нелинейностью (рис. 1). Материалы пленок и подложки характеризуются высокой оптической стойкостью, прозрачны в

диапазонах длин волн накачки и второй гармоники и сильно различаются по показателям преломления.

Оптический волновод, в отличие от объемной схемы реализации ГВГ, позволяет при одинаковой поляризации волн накачки и второй гармоники обеспечить равенство их фазовых скоростей. В этом случае становится возможным использование наибольшей компоненты тензора нелинейной восприимчивости материала подложки $d_{33} = 18.5 \text{ pm/V}$ [2]. Выбирая ТЕ-поляризацию волн накачки и второй гармоники, следует ориентировать кристаллографическую ось c в плоскости подложки перпендикулярно направлению распространения взаимодействующих волн (рис. 1).

Наибольший практический интерес представляет фазовый синхронизм низших волноводных мод рассматриваемой структуры: волн накачки TE_0^ω и гармоники $TE_1^{2\omega}$. Точка пересечения дисперсионных кривых этих мод, в которой достигается равенство их эффективных показателей преломления $n_{eff}^\omega = n_{eff}^{2\omega}$, находится вблизи отсечки волны второй гармоники. Поэтому доли мощности, переносимые этими модами в нелинейной подложке, интеграл перекрытия их полей, и, следовательно, эффективность ГВГ максимальны.

На рис. 2 детально показана область пересечения дисперсионных кривых волноводных мод TE_0^ω и $TE_1^{2\omega}$. Интересная особенность рассматриваемой структуры заключается в том, что при фиксированной толщине пленки Ta_2O_5 могут существовать два значения толщины пленки Nb_2O_5 , при которых реализуется фазовый синхронизм (рис. 2, *a*). Можно подобрать такую толщину пленки Ta_2O_5 , что дисперсионные кривые взаимодействующих мод будут касаться в одной точке (рис. 2, *b*). В этом случае существенно ослабляются требования к точности изготовления пленки Nb_2O_5 заданной толщины.

В ходе расчетов выяснилось, что при фиксированных значениях рабочих длин волн и показателей преломления образующих волновод сред существует область толщин пленок, в которой может выполняться условие фазового синхронизма мод TE_0^ω и $TE_1^{2\omega}$. Координаты каждой точки сплошной кривой, изображенной на рис. 3, соответствуют толщинам пленок, при которых $n_{eff}^\omega = n_{eff}^{2\omega}$. Указанная область ограничена. Толщина пленки Nb_2O_5 не может превышать значения, соответствующего фазовому синхронизму в волноводной структуре с бесконечной толщиной пленки Ta_2O_5 . С другой стороны, в области малых толщин пленки Nb_2O_5 не существует волноводной моды $TE_1^{2\omega}$,

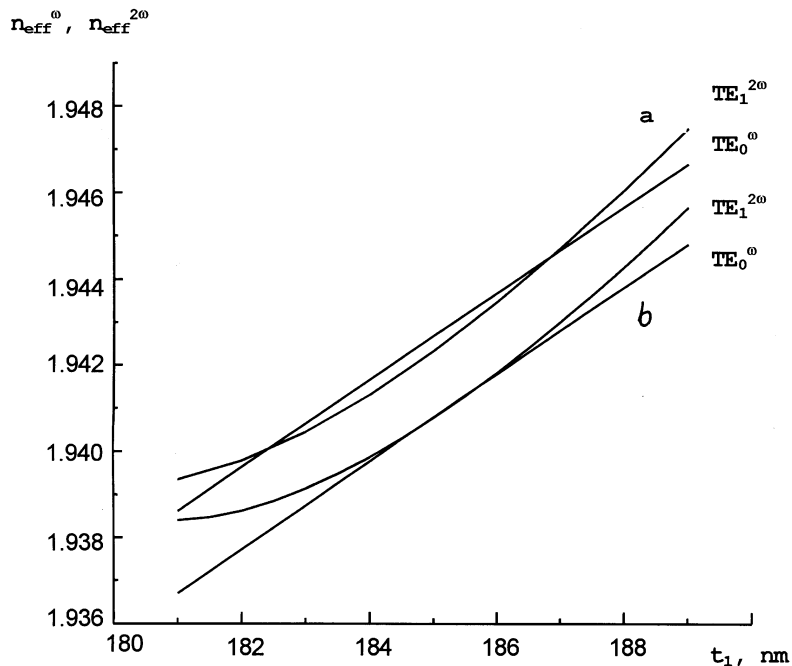


Рис. 2. Фазовый синхронизм волн TE_0^{ω} и $TE_1^{2\omega}$ при разных толщинах пленки Ta_2O_5 : a — $t_2 = 56$ nm; b — $t_2 = 52$ nm.

и волна второй гармоники может существовать в подложке в виде излучения Черенкова. Границей области излучения Черенкова является штриховая линия (рис. 3), в каждой точке которой выполняется условие отсечки моды $TE_1^{2\omega}$: $n_{eff}^{2\omega} = n_{КТР}^{2\omega}$.

Для каждой точки сплошной кривой, представленной на рис. 3, рассчитывалась нормированная эффективность ГВГ η в полосковом удвоителе частоты Ta_2O_5 - Nb_2O_5 -КТР шириной 3μ . Зависимость этой величины от толщины пленки Nb_2O_5 приведена на рис. 4. Как видно из графика, кривая нормированной эффективности ГВГ имеет максимум. В этой же точке достигает наибольшего значения интеграл перекрытия полей мод TE_0^{ω} и $TE_1^{2\omega}$ в нелинейной подложке. Главной причиной резкого изменения величины этого интеграла является сильная зави-

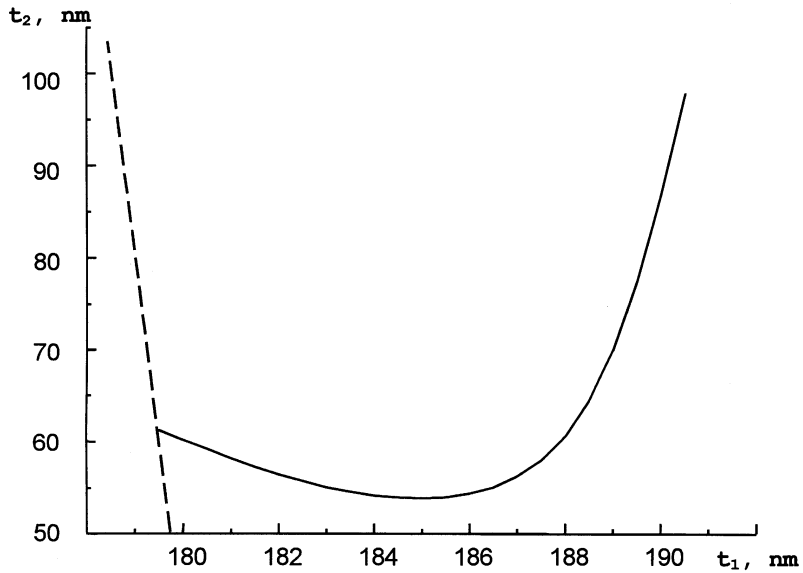


Рис. 3. Диаграмма режимов ГВГ. В точках на сплошной кривой выполняется условие фазового синхронизма волноводных мод TE_0^ω и $TE_1^{2\omega}$.

симость распределения поля волны $TE_1^{2\omega}$ вблизи отсечки от толщины пленки Nb_2O_5 .

Максимальное расчетное значение нормированной эффективности преобразования во вторую гармонику равно $1010\% W^{-1} \cdot cm^{-2}$. При мощности волны накачки в волноводе $100 mW$ и длине взаимодействия $3 nm$ мощность волны второй гармоники составляет $9 mW$. Сравнение полученного результата с литературными данными [2,3] показывает, что по нормированной эффективности преобразования рассматриваемая система превосходит все известные конструкции удвоителей частоты на основе кристалла КТР.

Важной характеристикой оптического удвоителя частоты является $\Delta\lambda$ — спектральная ширина фазового синхронизма, нормированная на единицу длины нелинейного взаимодействия [4]. Для расчета $\Delta\lambda$ использовались измеренные на нескольких лазерных длинах волн значения показателей преломления материалов пленок и методика интерполяции,

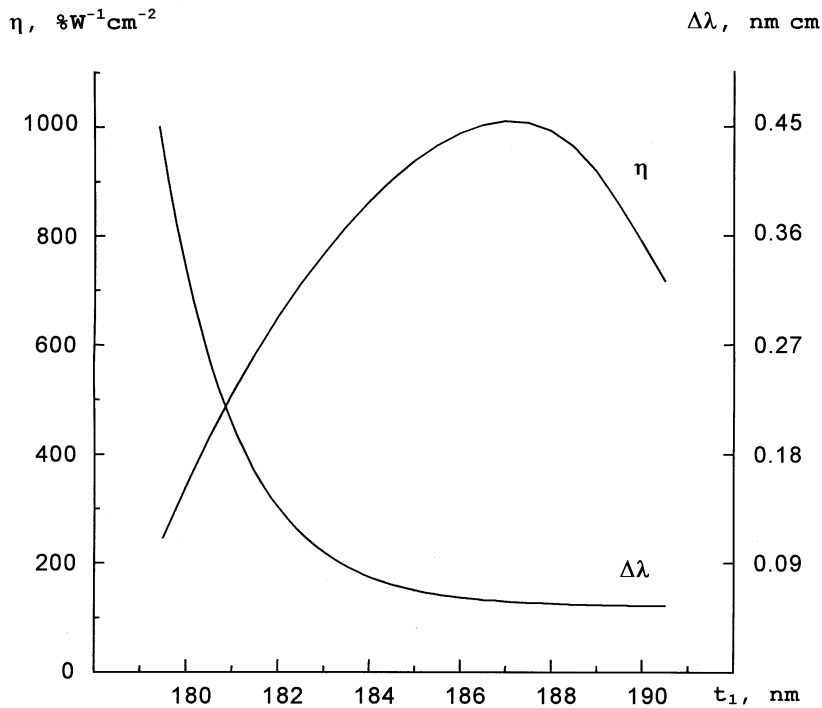


Рис. 4. Зависимость нормированных характеристик полоскового удвоителя частоты от толщины пленки Nb_2O_5 .

изложенная в [5]. В максимуме нормированной эффективности ГВГ расчет дает значение $\Delta\lambda = 0.06 \text{ nm} \cdot \text{cm}$. При смещении влево по сплошной кривой на рис. 3 величина $\Delta\lambda$ монотонно возрастает и в точке, соответствующей отсечке моды $TE_1^{2\omega}$, достигает максимального значения $0.45 \text{ nm} \cdot \text{cm}$ (рис. 4). Характер изменения $\Delta\lambda$ с уменьшением толщины пленки Nb_2O_5 определяется ростом доли мощности, переносимой модой $TE_1^{2\omega}$ в подложке, который приводит к быстрому уменьшению величины дисперсии $n_{eff}^{2\omega}$ и ее сближению с дисперсией n_{eff}^ω .

Возможность существенного увеличения $\Delta\lambda$ в предложенной структуре становится практически важной при использовании в качестве

источников накачки импульсных полупроводниковых лазеров. Так, при длине нелинейного взаимодействия 3 mm спектральная ширина фазового синхронизма достигает значения 1.5 nm, что позволяет эффективно удваивать частоту излучения накачки с длительностью импульсов до 1 ps. Увеличенная спектральная ширина фазового синхронизма крайне желательна и при создании волноводных нелинейных параметрических перестраиваемых генераторов оптического излучения связанного диапазона в области длин волн 1300–1600 nm.

Нелинейные волноводные пленочные структуры изготавливались методом высокочастотного катодного распыления. Этому методу свойственна относительно небольшая скорость осаждения пленок, что позволяет с высокой точностью контролировать их толщины по времени нанесения. Для получения высокой эффективности ГВГ необходимо, чтобы при изготовлении волноводной структуры погрешность по толщинам пленок не превышала единиц ангстрем, а по показателям преломления — единиц в четвертом знаке после запятой. Требуемую точность измерения оптических параметров волноводных пленок позволяет обеспечить использованный нами метод измерения эффективных показателей преломления с помощью призмного элемента связи [6].

С целью определения показателей преломления пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 были изготовлены калибровочные серии образцов. Пленки наносились на подложки из КТР распылением металлических мишеней в кислородно-аргоновой смеси. От образца к образцу менялись параметры высокочастотного плазменного разряда. Полученные пленки имели высокое оптическое качество и различались величинами скорости осаждения и показателей преломления. В результате был выбран технологический режим нанесения пленок Nb_2O_5 , обеспечивающий максимальные значения показателей преломления на рабочих длинах волн. Эти величины составили $n_1^\omega = 2.1880$ на длине волны накачки $\lambda^\omega = 859.2$ nm и $n_1^{2\omega} = 2.3712$ на длине волны второй гармоники. Для изготовления пленки Ta_2O_5 был выбран режим, позволяющий получить показатели преломления $n_2^\omega = 1.8791$, $n_2^{2\omega} = 1.9629$.

На основе полученных экспериментальных значений показателей преломления были рассчитаны толщины пленок, при которых выполняется условие фазового согласования волноводных мод TE_0^ω и $\text{TE}_1^{2\omega}$. Зная скорости осаждения пленок, мы вычислили времена их нанесения и изготовили образцы для эксперимента по ГВГ. Образцы различались

толщиной пленки Nb_2O_5 , толщина пленки Ta_2O_5 не изменялась и была равна 55 нм.

В образце с толщиной пленки Nb_2O_5 183 нм экспериментально наблюдалась волноводная генерация второй гармоники. В качестве источника излучения накачки использовался титан-сапфировый лазер, допускающий перестройку длины волны в диапазоне 850–860 нм. ГВГ наблюдалась при работе лазера как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы лазера. Излучение накачки с длиной волны 859.2 нм фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 10 см и с помощью призмленного элемента связи вводилось в волновод. Излучение на частотах накачки и второй гармоники выводилось из волновода с помощью второго призмленного элемента связи. При работе лазера в непрерывном режиме в области выводной призмы были измерены значения n_{eff}^ω и $n_{eff}^{2\omega}$, оказавшиеся равными 1.9408.

Измерение мощностей, переносимых волнами накачки и второй гармоники, проводилось при работе лазера в импульсном режиме. Длительность импульсов составляла 0.1 ps, а частота следования — 100 МГц. При ширине области нелинейного взаимодействия 300 μm , длине взаимодействия 3 мм и средней мощности волны накачки в волноводе 3 мВт средняя мощность волны второй гармоники составила 15 μW .

В образцах с меньшей толщиной пленки Nb_2O_5 ГВГ всюду в пределах диапазона перестройки лазера наблюдались в виде излучения Черенкова. Измерение эффективного показателя преломления волны накачки при $\lambda^\omega = 859.2$ нм показало, что значение $n_{eff}^\omega = 1.9107$ меньше, чем показатель преломления подложки $n_{\text{КТР}}^{2\omega} = 1.9384$.

Таким образом, в настоящей работе для удвоения частоты излучения полупроводникового лазера предложено использовать ГВГ в волноводе из пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 на кристаллической подложке КТР. Выбраны толщины пленок, при которых достигается максимальное значение интеграла перекрытия полей мод TE_0^ω и $\text{TE}_1^{2\omega}$. Показано, что использование полосковой волноводной конструкции на основе высокопреломляющих пленок Nb_2O_5 и Ta_2O_5 позволяет получить предельно высокие значения плотности оптической мощности в области нелинейного взаимодействия с площадью поперечного сечения $0.3 \times 3 \mu\text{m}$ и достичь рекордного для структур на основе КТР значения нормированной эффективности преобразования — $1010\% \text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Показано, что подбором толщин пленок в волноводной структуре $Ta_2O_5-Nb_2O_5$ -КТР можно эффективно управлять величинами дисперсии эффективных показателей преломления мод разных частот. Продемонстрирована возможность увеличения нормированной спектральной ширины фазового синхронизма с 0.05 до 0.45 nm · см.

В эксперименте наблюдалась ГВГ лазерного излучения с длиной волны 859.2 nm в волноводе $Ta_2O_5-Nb_2O_5$ -КТР.

Авторы выражают благодарность С.А. Крикунову и С.А. Магницкому за предоставленные кристаллические подложки и содействие в проведении измерений с использованием титан-сапфирового лазера.

Список литературы

- [1] *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals* / Ed. by: D.S. Chemla, J. Zyss. New-York: Academic Press, 1987. V. 1. 355 p.
- [2] *Doutuki T., Tamada H., Saitoh M.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 2519–2523.
- [3] *Eger D., Oron M., Katz M.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 3208–3211.
- [4] *Гурзадян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н.* // Нелинейно-оптические кристаллы. Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 159 с.
- [5] *Ingrej S., Westwood W., Cheng Y.* // Appl. Opt. 1975. V. 14. P. 2194–2198.
- [6] *Herrman P.* // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 3261–3263.