

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ВЫРОЖДЕННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

А.И. Игнатов * ¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 12.02.2024

Одобрена после рецензирования 11.04.2024

Принята к публикации 21.05.2024

Аннотация

Предложен оптический управляемый амплитудный модулятор (затвор) на основе периодически гофрированного двухмодового волновода из электрооптического материала. В таком волноводе при наличии электрооптического эффекта Поккельса возможна гибридизация двух волноводных мод и в результате возникновение в определенном диапазоне частот запрещенной зоны, вырожденной по поляризации волноводной моды (так называемой вырожденной запрещенной зоны, или внутриволноводной запрещенной зоны). Для примера планарного волновода из материала с характеристиками, близкими к ниобату лития, с синусоидальной гофрированной верхней поверхностью численно рассчитаны характеристики вырожденной запрещенной зоны. Показано, что запрещенная зона формируется одновременно для обеих волноводных мод. При этом вне запрещенной зоны коэффициент прохождения волны через модулятор для поляризации, совпадающей с поляризацией падающей волны, более 90% по мощности, тогда как коэффициент прохождения в кросс-поляризацию менее 0,1% по мощности при наличии гибридизации мод во всем диапазоне частот в окрестности запрещенной зоны. В запрещенной зоне основное отражение осуществляется в кросс-поляризацию (более 95% по мощности), тогда как отражение в поляризацию, соответствующую поляризации падающей волны, составляет менее 2% по мощности во всем диапазоне частот в окрестности запрещенной зоны. Оцениваемая эффективность предлагаемого модулятора (произведение электрического напряжения, обеспечивающего электрооптический эффект, на длину волновода, на которой коэффициент прохождения падает ниже 10% по мощности) составляет около 2 В·см, что соответствует характерной эффективности интегрированных волноводных электрооптических модуляторов, представленных в литературе.

Ключевые слова: Электрооптический модулятор, эффект Поккельса, вырожденная запрещенная зона, гофрированный волновод, вращение поляризации

EDN EXMJRJ

doi:10.24412/2949-0553-2024-210-04-10

Введение

В настоящее время интегральная волноводная оптика является бурно развивающимся научно-техническим направлением, имеющим широкий спектр приложений в телекоммуникациях и передаче данных в дата-центрах [1, 2], в лидарах для управления амплитудой и направленностью лазерного луча [3], в оптических вычислениях на чипе [4, 5]. Во всех этих приложениях в качестве одного из основных элементов используются управляемые волноводные амплитудные модуляторы, позволяющие управлять амплитудой проходящего по волноводу светового сигнала. Работа оптических модуляторов может быть основана на различных физических эффектах, таких как термооптический эффект в материале волновода [6], изменение концентрации носителей заряда в материале волновода [7], электрооптический эффект Поккельса [8], магнитооптические эффекты Фарадея и Керра, эффект Франца-Келдыша и др. Модуляторы на основе электрооптического эффекта Поккельса являются одними из наиболее быстрых, имеющих низкое энергопотребление на одно переключение из открытого в закрытое состояние, а также имеющих низкие потери сигнала в открытом состоянии (кроме плазмонных электрооптических модуляторов) [8]. Оптические волноводные модуляторы могут создаваться на основе различных оптических

* Автор, ответственный за переписку: Антон Игоревич Игнатов, ignatovtoha@inbox.ru

схем, таких как однопроходная схема, схема на основе волноводного интерферометра Маха-Зендера, схема на основе кольцевого волноводного резонатора, а также схема на основе периодически гофрированного волновода с запрещенной зоной. В настоящей работе будет предложен и теоретически изучен электрооптический модулятор на основе эффекта Поккельса, работающий в схеме периодического волновода с вырожденной запрещенной зоной.

Периодические волноводы с вырожденной запрещенной зоной

В настоящей работе мы рассмотрим периодический волновод с вырожденной запрещенной зоной. В отличие от обычной запрещенной зоны, формирующейся на границе зоны Бриллюэна при условии $k_{Bl}D = \pi m$, где k_{Bl} - блоховское волновое число моды периодического волновода, D - период волновода, m - целое число, вырожденная запрещенная зона может формироваться внутри приведенной зоны Бриллюэна [9]. Для формирования вырожденной запрещенной зоны в волноводе необходимо существование минимум двух волноводных мод. При определенных условиях две волноводные моды гибридизуются, и в окрестности частоты, на которой пересекаются дисперсионные ветви двух волноводных мод в приведенной зоне Бриллюэна, формируется вырожденная запрещенная зона (см. Рис. 1) [9]. Данная запрещенная зона формируется одновременно для обеих мод (из-за чего и называется вырожденной) при условии

$$(k_{Bl1} + k_{Bl2})D = 2\pi m. \quad (1)$$

Это условие можно трактовать как условие конструктивной интерференции волны, отраженной от границы периода, и волны, прошедшей через период в одном направлении с волновым числом k_{Bl1} , затем отраженной назад и прошедшей через этот же период уже с волновым числом k_{Bl2} . Такое преобразование волнового числа волны при ее отражении от границы периода возможно при наличии гибридизации двух мод волновода.

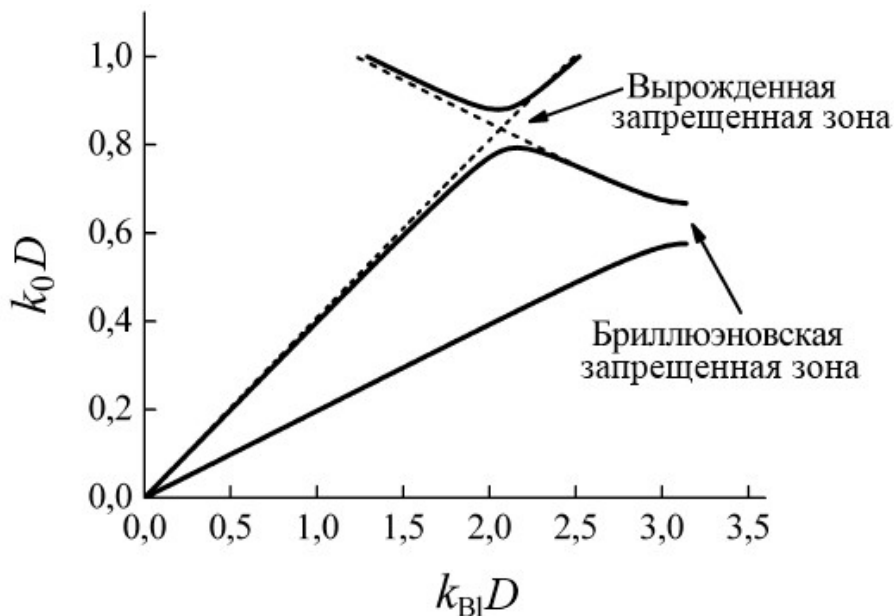


Рисунок 1 – Типичная картина дисперсионных зависимостей в приведенной зоне Бриллюэна. В отсутствие гибридизации двух мод дисперсионные зависимости показаны пунктирными линиями. На границе зоны Бриллюэна расположена запрещенная зона. При наличии гибридизации двух мод их дисперсионные зависимости показаны сплошными линиями. В окрестности точки пересечения дисперсионных зависимостей двух мод формируется запрещенная зона (вырожденная) одновременно для обеих мод внутри зоны Бриллюэна

Чтобы пояснить механизм такой гибридизации, рассмотрим, например, планарный периодический гофрированный волновод, изображенный на Рис. 2. Волна в таком волноводе распространяется вдоль оси x , волновод имеет бесконечную ширину в направлении оси z . В случае если тензор диэлектрической проницаемости материала волновода является диагональным, то в таком периодическом волноводе будут существовать две независимые волноводные моды с ортогональными поляризациями: ТЕ-мода (ее электрическое поле имеет только z -компоненту) и ТМ-мода (ее электрическое поле поляризовано в плоскости xy). Однако, если тензор диэлектрической проницаемости материала волновода будет иметь ненулевые компоненты ε_{yz} и ε_{zy} , то каждая из двух мод будет иметь все три ненулевые компоненты

электрического поля. Отражаясь от неоднородности, одна мода будет частично преобразовываться во вторую. Таким образом, если благодаря эффекту Поккельса тензор диэлектрической проницаемости материала волновода будет приобретать ненулевые значения ε_{yz} и ε_{zy} при наложении постоянного электрического поля (тогда как в нулевом внешнем поле $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = 0$), то наложение внешнего электрического поля может приводить к формированию вырожденной запрещенной зоны и блокированию прохождения обеих мод через гофрированный волновод достаточно большой длины.

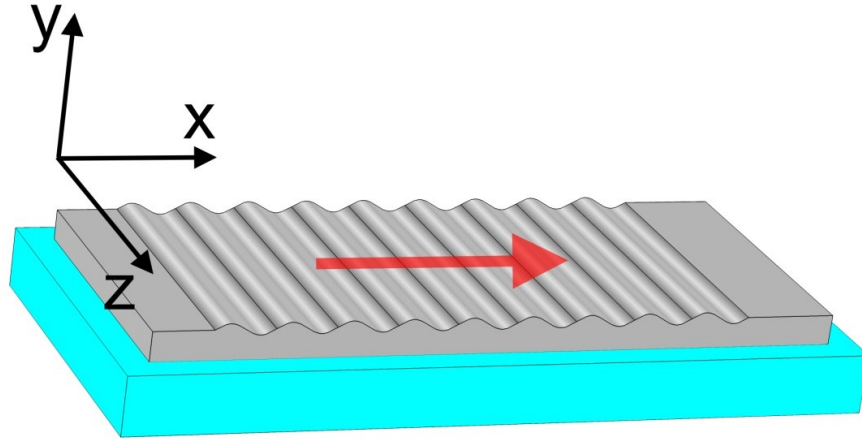


Рисунок 2 – Схема планарного волновода с синусоидально гофрированной поверхностью на подложке. Красная стрелка указывает направление распространения волноводной моды

Оптический модулятор на основе периодического гофрированного волновода из анизотропного электрооптического материала с вырожденной запрещенной зоной

В качестве примера волновода, в котором реализуется управляемая внешним электрическим полем вырожденная запрещенная зона, рассмотрим планарный гофрированный волновод из материала, по свойствам близкого к кристаллу ниобата лития LiNbO_3 [10]. Кристалл ниобата лития имеет тригональную $3m$ симметрию кристаллической решетки, при наложении электрического поля на него в определенных направлениях возможен поворот главных осей тензора диэлектрической проницаемости. Положим, что в отсутствие внешнего электрического поля тензор диэлектрической проницаемости имеет диагональный вид с компонентами $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 8.0$ (у ниобата лития в видимом диапазоне длин волн диагональные компоненты тензора имеют небольшую анизотропию и имеют значения около 5). Предположим, что оптическая ось кристалла перпендикулярна плоскости волновода (т.е. параллельна оси y , Рис. 2), а плоскость симметрии m кристалла параллельна плоскости yz . В этом случае при наложении постоянного электрического поля вдоль оси z тензор диэлектрической проницаемости приобретает ненулевые компоненты ε_{yz} и ε_{zy} , тогда как другие недиагональные компоненты ε_{xy} , ε_{yx} , ε_{xz} и ε_{zx} остаются равными нулю [10]. При включенном внешнем электрическом поле положим $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = 0.4$ (данная величина недиагональной компоненты тензора диэлектрической проницаемости определяется линейным электрооптическим коэффициентом r_{51} , который в случае ниобата лития $r_{51} = 32,6 \cdot 10^{-12}$ м/В [10]), что в случае $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 8.0$ и $r_{51} = 32,6 \cdot 10^{-12}$ м/В реализуется при величине постоянного электрического поля 200 В/мкм. В действительности при наложении электрического поля диагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости также меняют значения, но эти изменения относительно невелики (около 1% при рассматриваемых величинах внешнего поля).

Рассмотрим планарный волновод из материала с описанными значениями компонент тензора диэлектрической проницаемости, окруженный сверху и снизу вакуумом. Пускай средняя толщина волновода составляет $d = 100$ нм, верхняя граница волновода гофрирована в форме синусоиды с амплитудой $a = 20$ нм и периодом $D = 250$ нм, а нижняя граница волновода является плоской, так что толщина волновода варьируется от 80 нм до 120 нм. В окрестности рабочей длины волны $\lambda = 798.5$ нм негофрированный волновод (с постоянной толщиной $d = 100$ нм) при включенном внешнем электрическом поле имеет две волноводные моды с эффективными показателями преломления, соответственно, $n_1 = 2,072$ и $n_2 = 1,13$ при $\lambda = 798.5$ нм (эффективные показатели преломления анизотропного планарного волновода вычислены с помощью Comsol Multiphysics). На данной длине волны выполняется условие (1) формирования вырожденной запрещенной зоны $(n_1 + n_2) D/\lambda = 1,003 \approx m = 1$. Далее приводятся рассчитанные с помощью Comsol Multiphysics частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения (по мощности) через участок гофрированного волновода во внешнем постоянном

электрическом поле, образованный N периодами (т.е. длина рассматриваемого модулятора составляет $L = ND$). Рассчитывались коэффициенты прохождения по мощности T_{11} , T_{22} , T_{21} , T_{12} . Первые два из них представляют собой коэффициенты прохождения в моду 1 (базовая) (соответственно, во вторую моду – 2) при падающей на модулятор волноводной моде 1 (соответственно, при падающей моде 2). Третий и четвертый коэффициенты представляют собой коэффициенты прохождения в кросс-поляризацию: коэффициент прохождения в моду 2 при падающей моде 1 (соответственно, в моду 1 при падающей моде 2). Также рассчитывались коэффициенты отражения по мощности R_{11} , R_{22} , R_{21} и R_{12} . Первые два из них представляют собой коэффициент отражения в моду 1 при падающей на модулятор моде 1 (соответственно, коэффициент отражения в моду 2 при падающей на модулятор моде 2). Третий и четвертый коэффициенты представляют собой коэффициенты отражения в кросс-поляризацию: коэффициент отражения в моду 2 при падающей моде 1 (соответственно, коэффициент отражения в моду 1 при падающей моде 2).

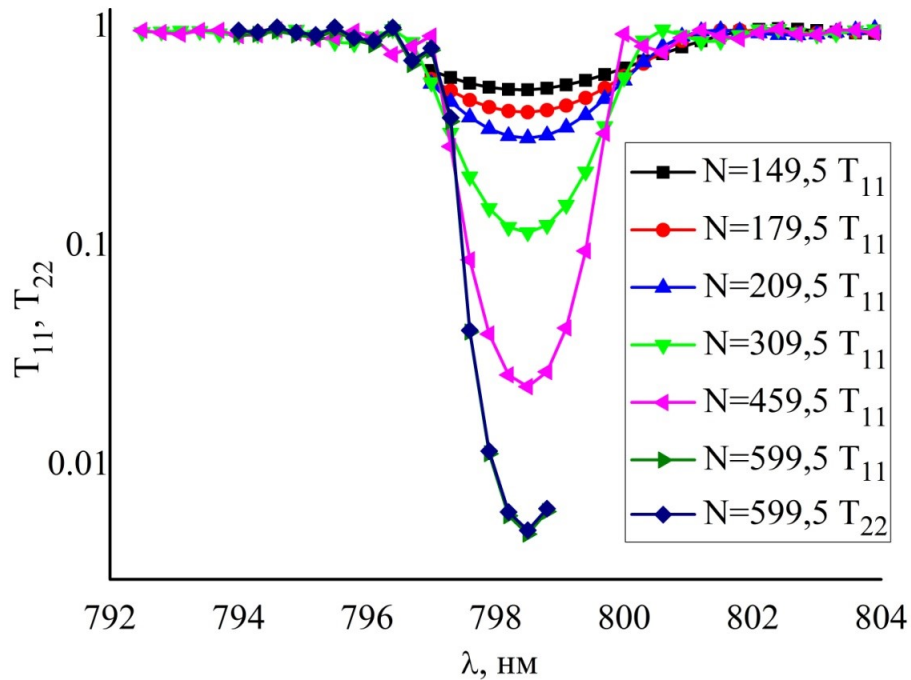


Рисунок 3 – Частотные зависимости коэффициентов прохождения T_{11} и T_{22} через модулятор с включенным внешним полем при разной длине модулятора (N – количество периодов гофра)

На рисунках 3 и 4 приведены частотные зависимости различных компонент коэффициентов прохождения через модулятор разной длины с включенным внешним электрическим полем. Видно, что в окрестности длины волны $\lambda = 798.5$ нм формируется вырожденная запрещенная зона, проявляющаяся в стремлении коэффициентов прохождения T_{11} и T_{22} к нулю с ростом длины модулятора. При $N = 599,5$ расчет сделан для обоих коэффициентов T_{11} и T_{22} : он показывает приближенное равенство этих коэффициентов прохождения, что подтверждает вырожденность запрещенной зоны. Видно также, что коэффициенты прохождения в кросс-поляризованную моду T_{21} , T_{12} составляют менее 0,1% во всем рассматриваемом диапазоне длин волн.

На рисунке 5 приведены частотные зависимости различных компонент коэффициентов отражения от модуляторов разной длины с включенным внешним электрическим полем. В окрестности длины волны $\lambda = 798.5$ нм коэффициенты отражения в кросс-поляризацию R_{21} и R_{12} близки к единице и равны друг другу. При этом коэффициенты отражения R_{11} и R_{22} в моду, соответствующую падающей моде, составляют менее 2% во всем рассматриваемом диапазоне длин волн.

Одной из важнейших характеристик модулятора является его эффективность. В случае амплитудного модулятора эффективность представляет собой произведение подаваемого на модулятор электрического напряжения на длину модулятора, на которой величина затухания волны достигает 10 дБ. При выбранных нами параметрах тензора диэлектрической проницаемости затухание сигнала в 10 дБ в центре вырожденной запрещенной зоны достигается при $N = 330$, т.е. при $L = 82,5$ мкм. Таким образом, при ширине волновода (расстоянии между электродами) порядка 1 мкм оценка эффективности модулятора составит $200 \text{ В} \cdot 82,5 \text{ мкм} = 1,7 \text{ В} \cdot \text{см}$, что соответствует характерной эффективности интегрированных волноводных электрооптических модуляторов, представленных в литературе [8].

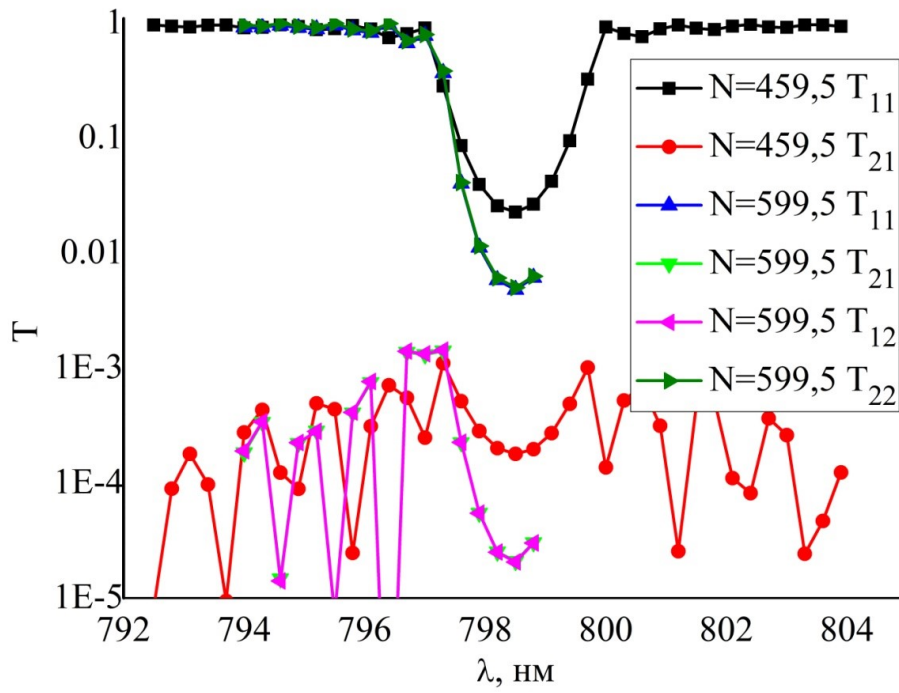


Рисунок 4 – Частотные зависимости различных коэффициентов прохождения T через модулятор с включенным внешним полем при разной длине модулятора N

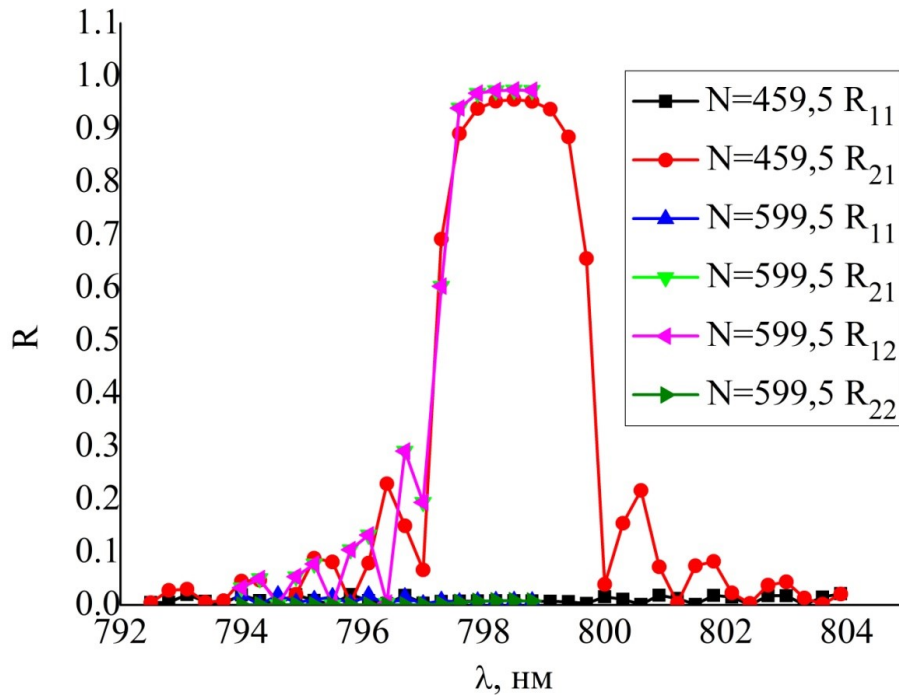


Рисунок 5 – Частотные зависимости различных коэффициентов отражения R от модулятора с включенным внешним полем при разной длине модулятора N

5. Заключение

Итак, нами был предложен и численно промоделирован электрооптический модулятор на базе периодически гофрированного планарного волновода с вырожденной запрещенной зоной. Предложенный модулятор может быть полезен для случая двухмодовых волноводов, когда требуется синхронная амплитудная модуляция коэффициента прохождения двух мод.

Оценка эффективности предложенного модулятора составила 2 В·см. Повышение эффективности возможно, например, путем некоторого увеличения амплитуды гофра либо путем использования других электрооптических материалов с более сильным эффектом Погкельса.

Описанный принцип создания амплитудного модулятора на базе периодического гофрированного волновода из анизотропного материала с вырожденной запрещенной зоной может быть также применен к волноводам из магнитооптических материалов (например, гранатов) в постоянном внешнем магнитном поле.

Список литературы

- [1] Doerr, C. R. Silicon photonic integration in telecommunications // *Front. in Physics*. – 2015. – Т. 3. – С. 37-52.
- [2] Chong Zhang and Bowers, J. E. Silicon photonic terabit/s network-on-chip for datacenter interconnection // *Optical Fiber Technol.* – 2018. – Т. 44. – С. 2-12.
- [3] Xiaochen Sun, Lingxuan Zhang, Qihao Zhang, and Wenfu Zhang. Si photonics for practical LiDAR solutions // *Appl. Sciences*. – 2019. – Т. 9. - №20. – 4225.
- [4] Shastri, B. J., Tait, A. N., Ferreira de Lima, T., Pernice, W. H. P., Bhaskaran, H., Wright, C. D. and Prucnal, P. R. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing // *Nat. Photonics*. – 2021. – Т. 15. – С. 102-114.
- [5] Miscuglio, M. and Sorger, V. J. Photonic tensor cores for machine learning // *Appl. Phys. Rev.* - 2020. – Т. 7. – 031404.
- [6] Tu, X., Song, C., Huang, T., Chen, Z., & Fu, H. State of the art and perspectives on silicon photonic switches. // *Micromachines*. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 51-69.
- [7] Thomson, D. J., Gardes, F. Y., Fedeli, J. M., Zlatanovic, S., Hu, Y., Kuo, B. P. P., Myslivets, E., Alic, N., Radic, S., Mashanovich, G.Z., & Reed, G. T. 50-Gb/s silicon optical modulator // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2011. – Т. 24. – №. 4. – С. 234-236.
- [8] Wang, C., Zhang, M., Chen, X., Bertrand, M., Shams-Ansari, A., Chandrasekhar, S., et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages // *Nature*. – 2018. – Т. 562. – №. 7725. – С. 101-104.
- [9] Ignatov, A. I., Merzlikin, A. M., Levy, M., & Vinogradov, A. P. Formation of degenerate band gaps in layered systems // *Materials*. – 2012. – Т. 5. – №. 6. – С. 1055-1083.
- [10] Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; пер. с англ. С.Г. Кривошлыкова, Н.И. Петрова. – М.: Мир, 1987. – 616 с.

ELECTROOPTIC WAVEGUIDE MODULATOR BASED ON A DEGENERATE BAND GAP

A.I. Ignatov*¹

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* ignatovtoha@inbox.ru

Abstract

A tunable optical amplitude modulator (gate) based on a periodically corrugated two-mode waveguide made of electrooptic material is proposed. In such a waveguide, in the presence of the electrooptic Pockels effect, hybridization of the two waveguide modes and, as a result, formation of a band gap in a certain frequency range degenerate to the polarization of the waveguide mode (the so-called degenerate band gap or intra-Brillouin band gap) can be realized. For the example of a planar waveguide with a sinusoidal corrugated top surface made of a lithium niobate-like material, the characteristics of the degenerate band gap have been numerically calculated. It has been shown that the band gap was formed simultaneously for both waveguide modes. Moreover, outside the band gap, the transmission coefficient of the wave through the modulator for the polarization coinciding with the polarization of the incident wave was more than 90% by power, while the transmission coefficient for the cross-polarization was less than 0,1% by power in the presence of the mode hybridization over the entire frequency range in the vicinity of the band gap. Inside the band gap, the main reflection occurs into the cross-polarization (more than 95% by power), while the reflection into the polarization corresponding to the polarization of the incident wave was less than 2% by power over the entire frequency range in the vicinity of the band gap. The estimated efficiency of the proposed modulator (the electrical voltage providing the electrooptic effect times the waveguide length for which the transmission coefficient becomes less 10% by power) was about 2 V*cm, which corresponds to the typical efficiency values for integrated waveguide electrooptic modulators presented in the literature.

Key words: Electrooptic modulator, Pockels effect, degenerate band gap, corrugated waveguide, polarization rotation
