



ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВЕТОДЕЛИТЕЛИ СЕРИИ ICE CUBE

М. Джордж (*Applications Scientist, Optics*).
Moxtek Inc., mgeorge@moxtek.com.

Светоделители находят приложение во многих оптических устройствах, где важно создать оптическую разность хода лучей, понизить бликование, сузить допуск на смещения луча, – конструкциях шлем-дисплеев, индикаторах на лобовых стеклах, в пикопроекторах и интерферометрах. В комбинации светоделителей с поляризаторами удается получить отличные результаты в схемах с низким диафрагменным числом.

Поляризационные светоделители могут быть полезны для задач, решение которых требует высокой компактности конструкции и пониженного уровня вибраций. В большинстве случаев применяют стандартные светоделители. Компания Moxtek предлагает для этих задач светоделители серии MacNeille. Однако при использовании оптических устройств, в основе которых лежит схема с объективом с низким диафрагменным числом (ДЧ) (большой угловой апертурой), происходит нарушение цветового баланса и контраста. Под контрастом условно подразумевается отношение коэффициента пропускания излучения в случае, когда плоскости поляризации падающего излучения и пропускания поляризованных светоделителей совпадают, к коэффициенту пропускания в случае, когда эти плоскости перпендикулярны. Поляризаторы, изготовленные по технологии nanowire ("нанонить"), напротив, демонстрируют высокую производительность работы в широком спектральном диапазоне от УФ- до ИК-диапазона и при малом ДЧ. Moxtek удалось добиться отличных результатов в приложениях с низким ДЧ, где требуется разделение световых потоков при использовании таких поляризаторов в качестве гипотенузы кубических светоделителей.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТОДЕЛИТЕЛЕЙ ПРИ МАЛОМ ДЧ

На рис.1 показан светодиод, излучение от которого после коллиматора проходит через диафрагму,

ICE CUBE POLARIZER

М. George (*Applications Scientist, Optics*). Moxtek Inc.,
mgeorge@moxtek.com.

Cube beamsplitters are found in a variety of applications where matching path lengths, reduced ghosting, and limited beam shift are important. Wire grid polarizers are known for excellent broadband performance in low f/D applications.

Cube beamsplitters are found in a variety of applications where matching path lengths, reduced ghosting, and limited beam shift are important. Polarizing beamsplitter (PBS) cube assemblies are found in head mounted displays (HMD), head-up displays (HUD), pico-projectors, and interferometers, and can be beneficial when a compact form factor or reduced mechanical vibration are required. Typically MacNeille cubes have been used for many PBS applications, but for low f/D 's (large cone angles), the color balance and the contrast ratio between passing and blocking state transmittance have been less than ideal. On the contrary, wire grid polarizers (WGP) are known for excellent broadband performance in low f/D applications. By incorporating a WGP along the hypotenuse of a cube beamsplitter, the Moxtek ICE Cube™ provides a superior PBS in low f/D applications.

TRANSMISSION MODE PERFORMANCE RESULTS AT LOW f/D

As depicted in figure 1(a), a white light LED source was collimated and passed through an iris followed by a high contrast pre-analyzer to select an input polarization state. The beam was then focused into MacNeille (top row) and Moxtek (bottom row) cube beamsplitters and the blocking state transmittance was minimized on a screen. The blocking state reflectance (R_s) and transmittance (T_s) were then imaged using a camera (fig. 1b, 1e). After rotating the pre-analyzers 90°, the passing state transmittance (T_p) and reflectance (R_p) were then imaged (fig. 1c, 1f). Finally, the pre-analyzer was rotated approximately 45° to give equal intensity in the reflected and transmitted beams to approximate a PBS configuration. As shown in figure 1, the ICE Cube has improved color balance and a reduced leakage in the blocking state (T_s) when compared to the MacNeille cube. The images represent about $f/1.5$ cube input cone angle, though the aperture was also varied to change the f/D (images not shown). Both cubes were also characterized at variable angles with well collimated light

расположенную перед вращающимся поляризатором для задания требуемого типа поляризации. Далее луч фокусируется на стандартный поляризатор (см. рис.1, верхняя часть) и кубический поляризатор компании Moxtek (см. рис.1, нижняя часть). При этом плоскости поляризации падающего излучения и пропускания поляризационных светоделителей перпендикулярны друг другу и, соответственно, интенсивность проходящего света в этом случае минимальна (s-конфигурация). Изображения, построенные отраженным и прошедшим лучами, построены на экране (рис. 1б, е). Далее поляризатор повернули на 90° , то есть плоскости поляризации падающего излучения и пропускания поляризационных светоделителей стали параллельны (p-конфигурация). И соответственно интенсивность проходящего света в этом случае максимальна. Результаты отображены на рис.1в, е.

После этого поляризатор повернули на угол 45° , чтобы уравнивать интенсивности отраженной компоненты света и прошедшей. Из результата (рис.1) следует сделать вывод, что в случае использования светоделителей серии Ice Cube изменений в цвете прошедшего и отраженного лучей не происходит, а в s-конфигурации интенсивность

Стандартные размеры светоделителей Moxtek

Длина × Ширина × Высота, мм..... 25,4×25,4×25,4
Отличительная чертаВысокий контраст
Наименование продукта ICE-CUBE-C

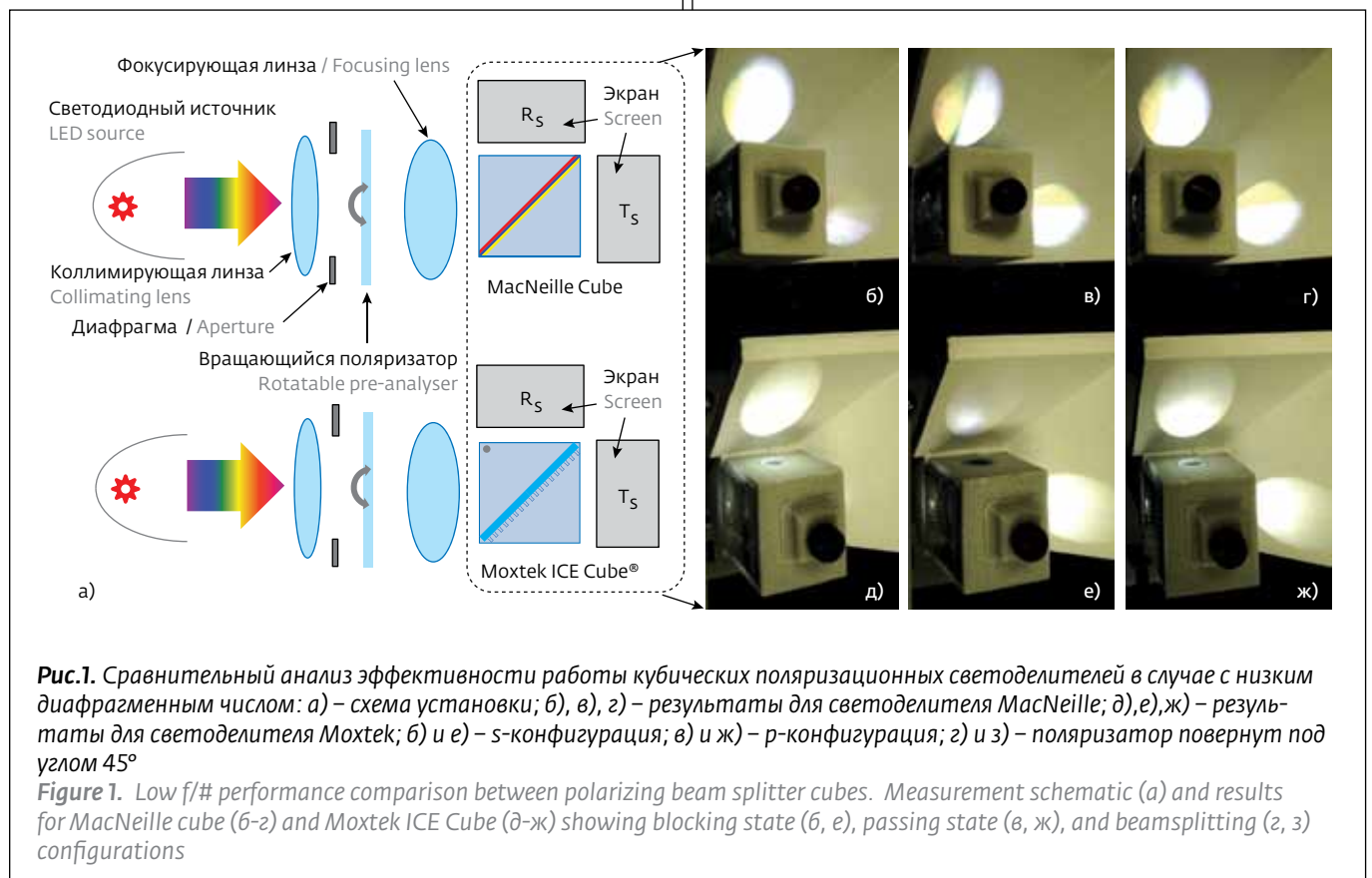
Возможно изготовление светоделителей под заказ по индивидуальным требованиям. За более подробной информацией обращайтесь к официальному представителю Moxtek.

Сферы применения

- 2D и 3D проекторы
- Шлем-дисплеи
- Индикаторы на лобовом стекле
- Интерферометрия
- Спектроскопия

from the UV to the SWIR and the Moxtek PBS cube showed marked improvement, accommodating angular deviations from normal incidence of $\pm 20^\circ$ in the azimuthal direction and $\pm 10^\circ$ in the polar (elevation) direction with minimal performance variation. See Moxtek's ICE Cube Technical Note for more details

Transmittance measurements using the figure 1 setup were also made by replacing the screen with a detector (ThorLabs





прошедшего излучения минимальна. Измерения проводились при ДЧ $f/D=f/1,5$. Однако данное ДЧ варьировалось (изображения, соответствующие этим вариациям, не приведены). Дополнительно были проведены эксперименты при варьировании угла падения излучения на светоделиТЕЛЬ в области длин волн от УФ- до ближнего ИК-спектра. Падающий луч от светодиода был хорошо сколлимирован. Результаты показали, что светоделители серии Ice Cube значительно лучше работают при варьировании азимутального угла до величин $\pm 20^\circ$, полярного угла – до $\pm 10^\circ$. Более подробное описание экспериментов можно найти на сайте компании Moxtek.

Далее были исследованы коэффициенты пропускания светоделителей. Схема экспериментальной установки подобна той, что приведена на рис.1, с тем лишь отличием, что экран был заменен детектором (производство Thorlabs, модель 5120C). Для угловой апертуры $\pm 16^\circ$ (ДЧ=1,74) отношение коэффициента пропускания p -к s -конфигурации составило 1470, в то время как то же самое отношение для стандартного светоделителя MacNeille составило 23. Коэффициент пропускания для p -конфигурации светоделителей Moxtek и MacNeille составил 74,8% и 78,6%, соответственно, в сравнении с пропусканием без светоделителей. В случае с меньшей угловой апертурой $\pm 4^\circ$ (ДЧ=6,45) контраст и коэффициент пропускания в p -конфигурации для светоделителя MacNeille выросли до значений 103 и 81,7%, соответственно, в то время как те же показатели для светоделителя Moxtek выросли до значений 6460 и 81,4%. Спектр излучения светодиода был исследован с помощью портативного оптоволоконного спектрометра. Результаты представлены на рис.2, где в спектре заметен пик на длине волны 450 нм и высокая интенсивность в области "зеленых" и "красных" длин волн. Для ограничения рассеянного света при измерении коэффициента пропускания без изменения угловой апертуры перед детектором была установлена диафрагма. В качестве поляризатора использовалась модель UVD240 (Moxtek). СветоделиТЕЛЬ MacNeille имел стандартное исполнение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ МОХТЕК ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ LCOS (ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ НА КРЕМНИИ)

В шлем-дисплеях, индикаторах на лобовом стекле и пикопроекторах обычно используют LCOS- или DMD-матрицы. Для воспроизведения оптической

Standard Sizes

Length × Width × Height, mm 25,4×25,4×25,4
Optimized High Contrast
Product Name..... ICE-CUBE-C

Custom sizes and optimization are available.
Please contact a sales representative for options and ordering details.

Applications

- Head-Mounted Display (HMD)
- Head-Up Display (HUD)
- 2D & 3D Projection Display
- Interferometry
- Spectroscopy

5120C). For a cone angle of $\pm 16^\circ$ (f/D of 1.74), the Moxtek ICE Cube had a contrast ratio between passing and blocking state transmittance (T_p/T_s) of 1470, while the MacNeille cube only had a measured contrast ratio of 23. Passing state transmittance (T_p) for the Moxtek and MacNeille cubes were about 74.8% and 78.6% respectively when compared to the raw transmittance without the cube. For a much smaller cone angle of $\pm 4.4^\circ$ (f/D of 6.45), the contrast ratio and T_p of the MacNeille cube only improved to 103 and 81.7% respectively, while the ICE Cube contrast ratio and T_p improved to 6460 and 81.4%. The white LED emission spectra was taken with portable fiber spectrometer and is presented in figure 2, showing a strong peak at about 450 nm and broadband emission in the red and green wavelengths. To limit stray light in transmittance measurements without impacting cone angle, an iris was placed in front of the detector. The pre-analyzer was a Moxtek UVD240 and the MacNeille cube was a typical thin film cube from a standard optical catalog supplier.

LCOS DISPLAY APPLICATION RESULTS

Applications such as HMD, HUD, and pico-projectors typically use either LCOS or DMD reflective panels. To simulate an LCOS display configuration using a PBS cube, a broadband quarter waveplate and mirror were placed in the transmitted beam path after the cube, and the retro-reflected beam was split off orthogonally, passed through a clean-up polarizer, and then measured using a detector or imaged onto a screen (fig. 1). This configuration is similar to a single pixel representation of a normally-off projection display application. Optimizing the quarter-waveplate orientation changes the p -polarization state passing through the cube into circular polarized light, which becomes polarized with the opposite handedness upon reflection, and finally converted to s -polarized light after passing back through the quarter-waveplate. After



схемы LCOS-проектора были использованы: кубический поляризационный светоделитель, четвертьволновая пластина с широким рабочим диапазоном длин волн и зеркало, расположенное в направлении пропускания лучей после светоделителя. Обратный луч от зеркала проходил через четвертьволновую пластину, отражался от светоделителя и, через анализатор, попадал на детектор или отображался на экране (рис.3). Данная оптическая схема представляет собой базовый элемент для построения двумерного изображения. Функция четвертьволновой пластины – изменить p -поляризацию луча, прошедшего сквозь светоделитель, на круговую поляризацию. Причем направленность поляризации изменялась после отражения от зеркала, луч вновь проходил сквозь пластину, и p -поляризация превращалась в поляризацию s -типа. После отражения от светоделителя s -поляризованный луч проходил сквозь анализатор, таким образом получали состояние "включено". С другой стороны, выравнивание осей наибольшей или наименьшей скорости распространения луча в пластине с плоскостью p -поляризации луча, прошедшего сквозь светоделитель, ведет к тому, что тип поляризации не изменяется. Далее, отражаясь от светоделителя, p -поляризованный луч проходил через анализатор, соответственно интенсивность на выходе была минимальна. Так получали состояние "выключено". Рассеивание света в системе в состоянии "выключено" имеет форму мальтийского креста и обусловлено неидеальностью

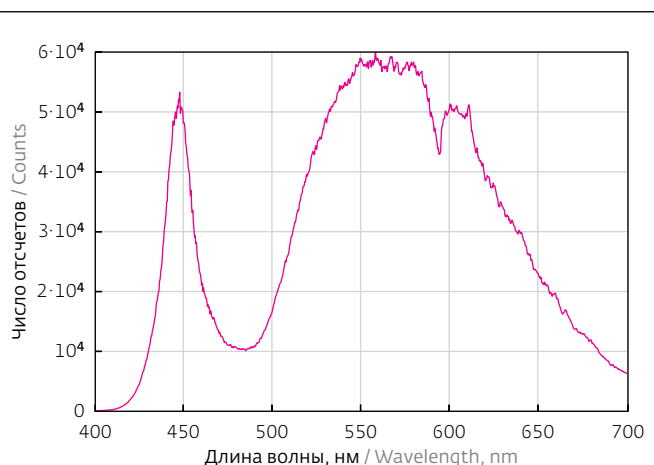


Рис.2. Спектр светодиодной лампы
Figure 2. White light LED emission spectrum.

reflecting off the beamsplitter, the s -polarization passes through the clean-up polarizer, producing the on-state. On the contrary, aligning the fast or slow axis of the waveplate with the p -polarization state that is transmitted through the cube leaves the linear polarization state unchanged. The retro-reflection off of the mirror largely passes through the cube and any R_p light is filtered out by the clean-up polarizer, produces the off-state image. The leakage through the system in the off-state takes the form of a Maltese Cross due to the geometric depolarization of the condenser lens. The Moxtek and MacNeille cube off-state leakage is shown in figure 3, parts (b) and (c) respectively for an f/D of 1.74. The system leakage in the dark state, and especially the color balance, are clearly superior for the Moxtek cube. For

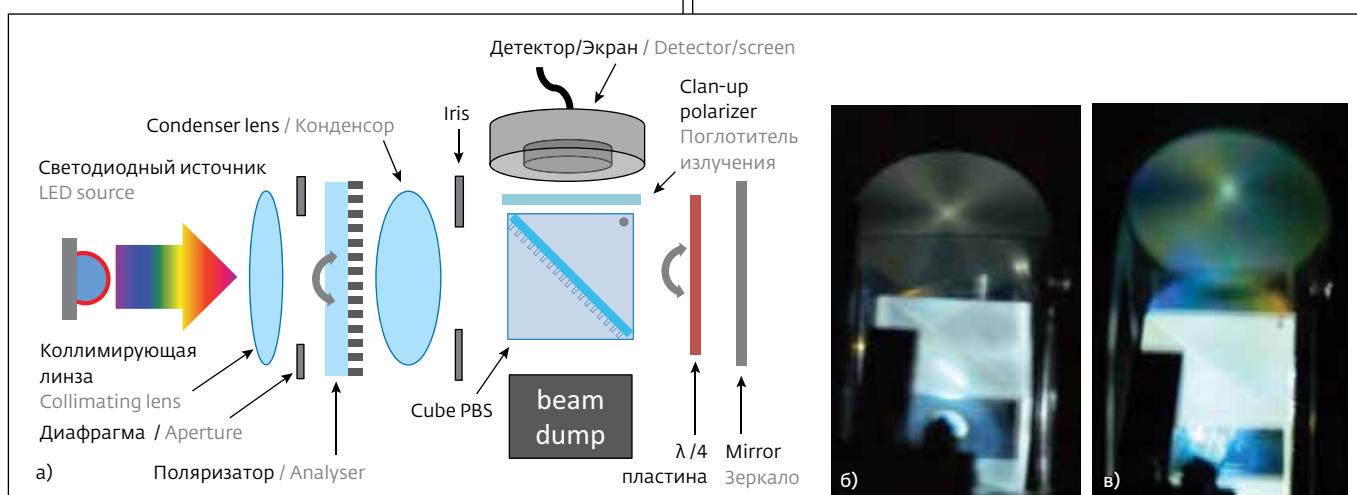


Рис.3. Сравнительный анализ эффективности работы кубических светоделителей в случае с низким диафрагменным числом для LCOS-приложений: а) – схема установки (слева), б) и в) – результаты для светоделителей Moxtek и MacNeille представлены для состояния "выключено"

Figure 3. Performance comparison between PBS cubes for low $f/\#$ display applications. Measurement schematic (a) and results for Moxtek ICE Cube (b) and MacNeille cube (c) showing the off-state with Maltese Cross



конденсорной линзы. Рассеяние от светодели- телей Moxtek и MacNeille изображено на рис.3б, в соответственно, при этом диафрагменное число соответствует 1,74. Видно, что степень рас- сеяния и однородность цвета более приемлемы в случае с использованием светодели- теля Moxtek. Для меньшего апертурного угла $\pm 4,4^\circ$ (ДЧ=6,45) кон- траст между состояниями "включено" и "выклю- чено" для светодели- телей Moxtek и MacNeille составляет 6600 и 4940 соответственно, в то время как относительный коэффициент пропускания - 41,2% и 55,8%. В случае с ДЧ=1,74 чувствительность детектора не позволила зарегистрировать сигнал. Для получения приемлемых результатов потребо- вался коллиматор. Падение на четвертьволновую пластину луча под углом, отличным от прямого, ограничивает производительность системы в слу- чае с малым ДЧ. Производителем четвертьвол- новой пластины является фирма Focstek Photonics, ее рабочий диапазон составляет 450-680 нм, про- изводитель зеркала - New Focus (модель 5108) с коэффициентом отражения порядка 90% во всем видимом диапазоне, производитель анализатора - Moxtek (модель UVC240), производитель поглотит- еля пучка - Acktar.

На рис.4 изображена схема функциони- рования светодели- теля Moxtek, где пластина,

a smaller cone angle of $\pm 4.4^\circ$ (f/D of 6.45) the measured contrast ratio between on and off states for the Moxtek and MacNeille cubes were 6,600 and 4,940 respectively, while system efficiencies were 41.2% and 55.8%. For an f/D of 1.74, the small detector could not capture a significant portion of the beam and a collimating lens would be needed before the detector to produce meaningful results. The non-normal incidence beam interacting with the quarter-waveplate may also be limiting system performance in the low f/D case depicted in figure 3. The quarter waveplate was from Focstek Photonics and was designed for 450-680 nm wavelengths, the mirror was New Focus D5108 with about 90% transmittance throughout the visible, and the clean-up polarizer was a Moxtek UVC240. The beam dump was Acktar Black Metal Velvet.

GENERAL PERFORMANCE CONSIDERATIONS

Figure 4 depicts the general beamsplitting function of the Moxtek ICE Cube, where the prism hypotenuse plane defines the s- and p-polarization states. The passing state transmittance is p-polarized with very high purity (T_p), while the reflected beam has both s-and p-polarization states (R_s and R_p). The p-polarized reflectance can be eliminated using a pre-analyzer or clean-up polarizer (as shown in figure 3). The typical spectral and angular performance results are summarized in the ICE Cube data sheet. Please see the Moxtek ICE Cube Technical

Особенности светодели- телей серии Ice Cube ICE Cube Features

Характеристика Feature	Значение
Габариты Size	1 дюйм ³ 1 inch cube (inquire for other dimensions)
Светодели- тельный элемент Beamsplitting component	Светодели- тельная пластина, выполненная по технологии паповире, расположенная вдоль гипотенузы куба Embedded wire grid along hypotenuse
Рабочий диапазон длин волн Spectral range	400-700 нм* / 400-700 нм*
Допустимый угол падения излучения Angular field	$\pm 25-30$ (азимутальный), $\pm 15-20$ (полярный) $\pm 25-30^\circ$ azimuthal $\pm 15-20^\circ$ polar (elevation)
Искажение волнового фронта прошедшего излучения TWD	$\lambda/3$
Угол отклонения луча Beam deviation	<3 аркмин. < 3 arcmin
Материал Material	Оптическое стекло N-BK7 N-BK7 glass
Ограничения Restrictions	Плотность потока излучения не более 5.5 Вт/см ² Нагрев не более 90 °C 5.5 W/cm ² and 90°C max

* Диапазон может быть расширен до ближнего ИК путем исключения просветляющего покрытия на гранях куба.

расположенная в месте гипотенузы куба, влияет на поляризацию света. Проходящий луч имеет только р-поляризацию. Отраженный луч имеет обе компоненты (s и p) поляризации, при этом р-компонента может быть отсечена путем использования анализатора (см. рис.3). Оценка изменения цвета после прохождения и отражения света от светоделителя, функционирование при различных углах падения излучения на светоделитель, а также сравнение результатов со светоделителями MacNeille представлены в техническом описании для светоделителей серии Ice Cube на сайте Moxtek. Технические характеристики и особенности применения для светоделителя серии Ice Cube приведены в таблице. Возможность работы при различных длинах волн и широкий допустимый угол захвата излучения являются важными критериями для использования светоделителей в конструкции виртуальных дисплеев, в то время как высокая величина светового потока и рабочая температура являются наиболее критичными параметрами для традиционных проекционных дисплеев. Упомянутые разность хода лучей и данные, показывающие эффективность работы светоделителей при различных углах падения излучения, важны для задач интерферометрии. Стоит отметить, что опционально доступно крепление оптических элементов (поляризаторов, анализаторов, фазовых пластин) к внешней части светоделителя. Это может послужить преимуществом для снижения межповерхностных потерь при отражении, а также эффектов, связанных с механическими вибрациями.

ВЫВОДЫ

Светоделители серии Ice Cube производства Moxtek со встроенным поляризатором, изготовленным по технологии "nanowire", показывают отличные характеристики в широком диапазоне длин волн, при различных углах падения излучения относительно грани светоделителя. В сравнении со стандартными светоделителями MacNeille, изменение цвета пучка после его прохождения/отражения от светоделителей Moxtek минимально. В то время как светоделители MacNeille могут работать только при небольших отклонениях падающего луча от нормали к грани, светоделители серии Ice Cube позволяют значительно расширить этот диапазон. Данное преимущество позволяет использовать светоделители Moxtek во многих приложениях, связанных со спектроскопией, в особенности там, где требуется компактное расположение элементов в оптической схеме. ■

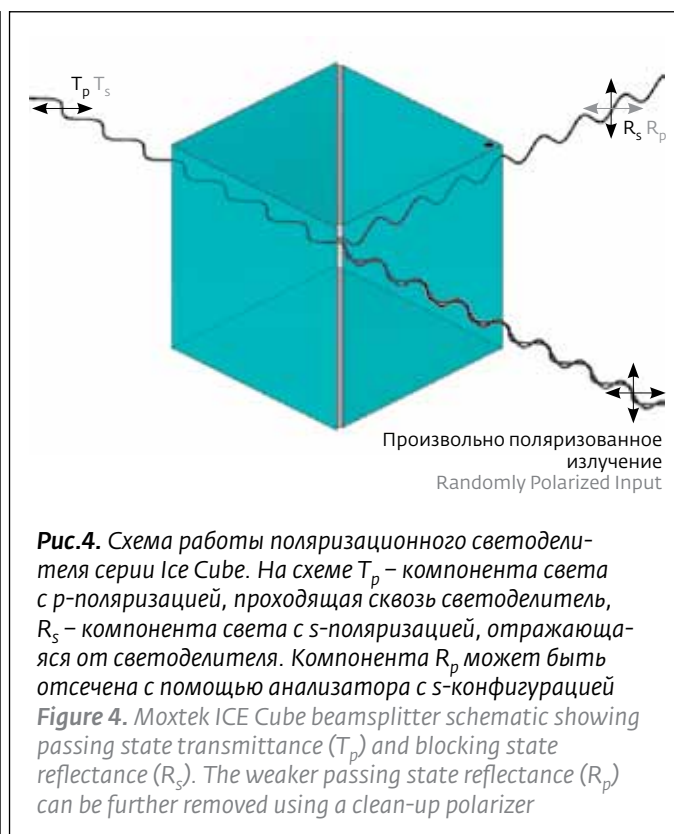


Рис.4. Схема работы поляризационного светоделителя серии Ice Cube. На схеме T_p – компонента света с р-поляризацией, проходящая сквозь светоделитель, R_s – компонента света с s-поляризацией, отражающаяся от светоделителя. Компонента R_p может быть отсечена с помощью анализатора с s-конфигурацией

Figure 4. Moxtek ICE Cube beamsplitter schematic showing passing state transmittance (T_p) and blocking state reflectance (R_s). The weaker passing state reflectance (R_p) can be further removed using a clean-up polarizer

Note for more details and further comparison to the MacNeille cube. The ICE Cube opto-mechanical design and environmental performance details are summarized in Table 1. The broadband performance and large angular field of view are important criteria in emerging near-eye display applications while the maximum luminous flux and operating temperature are more critical in traditional projection display applications. Also listed are path length and angular deviation measurements, which are important in interferometry applications. Optional assembly of optics in plate or film form (e.g. pre-analyzers, clean-up polarizers, waveplates), directly onto the cube face is possible. This could be advantageous to reduce interfacial reflectance losses and effects from mechanical vibration.

SUMMARY

The Moxtek ICE Cube beamsplitter with embedded nanowire grid polarizer provides superior broadband performance over a wide angular aperture, without the dramatic color shifts and angular performance variations evident in MacNeille cube beamsplitters. While MacNeille cube designs can typically only tolerate a narrow angular aperture before performance deteriorates, the Moxtek ICE Cube accommodates a much larger angular field of view, allowing the optical designer to maintain system performance in broadband spectroscopic applications with demanding form factors. ■

