



УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. Микинтас,
Altechna, sales@altechna.com, www.altechna.com,
Lituva

Лазер способен выполнять прецизионные задачи, воздействуя на материалы в пределах очень малого пространства, даже имеющего размеры на уровне дифракционного ограничения. Так что управление мощностью лазерного излучения является важной составляющей работы по оптимизации мощного излучения. В статье рассмотрены различные методы управления мощностью излучения твердотельных лазеров.

Самый простой способ управления выходной мощностью лазера заключается в изменении мощности накачки. В твердотельных лазерах с диодной накачкой (DPSS) мощность регулируется изменением тока диода. Однако такой способ не может обеспечить плавного и непрерывного управления мощностью по нескольким причинам. Дело в том, что изменение тока лазерного диода инициирует в нем температурный сдвиг, а это уже приводит к изменению ширины запрещенной зоны. Что соответственно ведет к сдвигу центральной длины волны излучения накачки и влияет на генерацию активной среды твердотельного лазера. В случае непрерывного режима работы лазера эта последовательность событий приводит к флуктуациям выходной мощности излучения, что требует времени для ее стабилизации. Если лазер работает в импульсном режиме (например, в схеме с пассивной модуляцией добротности), то помимо флуктуации выходной мощности происходит изменение частоты повторения и длительности импульсов. Более того, когда ток лазерного диода накачки варьируется в процессе работы, возникают дополнительные эффекты, создающие предпосылки для ухудшения параметров лазера [1]. Таким образом, способ изменения мощности лазера путем изменения тока накачки диода приемлем только для тех приложений, где резкие флуктуации мощности не оказывают существенного влияния на результат работы.

LASER POWER CONTROL UNITS

S. Milkintas,
Altechna, sales@altechna.com, www.altechna.com,
Lituva

Laser capability to accomplish extremely precise tasks by applying high power impact within tiny spatial domain, e.g. diffraction limited spot, has lead laser power control to become an important variable that helps to optimise yield and secure successful completion of the task. There are various methods to control the power of solid state lasers which will be reviewed in this article.

The simplest way to control laser output power is by controlling its gain medium pump power and in DPSS lasers it means adjustment of the current feeding laser diode. However such way of power control cannot ensure smooth and continuous laser power control because of several reasons. First of all, changing laser diode current introduces temperature shift in the diode which changes the band gap between conduction and valence bands, thus central wavelength of the pump is shifted, altering the conditions in solid state gain medium. In case of CW operation this string of related events introduce fluctuations in laser output power and it takes time to stabilize the power again. But if the laser is pulsed (e.g. passively Q-switched), not only the output power fluctuations are introduced, but also PRR and pulse duration would be altered with changing the pump power. What is more, when laser diode current is changed during the operation, additional degradation mechanisms emerge [1]. Thus this type of power control is only acceptable for the least power-sensitive applications.

Extra-cavity laser power control is yet the most popular method of laser power management, for instance absorbing neutral density glass filters are useful to discretely attenuate relatively low power beams and are quite effective up to 1 J/cm² energy densities within the nanosecond regime. ND filters provide rather even attenuation over wide spectral range from UV to NIR. Quite similar are reflective neutral glass filters which are coated with metallic layer that transmits a portion of the radiation while reflecting and absorbing the rest of it. Advantage provided by metallic semi-reflecting coating is the possibility to deposit thickness gradient of metallic

Еще более популярным методом управления мощностью лазера стало использование дополнительных устройств. Например, поглощающих нейтральных стеклянных фильтров, используемых для ослабления лучей с относительно малой мощностью. Эти фильтры стали довольно эффективными устройствами управления для излучения плотностью энергии до 1 Дж/см^2 в пределах наносекундного режима работы. Нейтральные фильтры обеспечивают достаточное затухание в широком спектральном диапазоне: от УФ- до ближнего ИК-диапазона. Существуют близкие им по своим свойствам светоотражающие нейтральные фильтры, которые покрыты слоем металла. Эти фильтры пропускают лишь часть излучения, отражая или поглощая все остальное. Преимущество металлического полупрозрачного покрытия состоит в том, что существует возможность наносить металлический слой, имеющий градиент по толщине, что позволяет непрерывно изменять пропускание вдоль поперечного сечения фильтра.

Генераторы с поляризованным выходным излучением позволяют управлять своей выходной мощностью путем варьирования поляризации (рис.1). Управление осуществляется с помощью поляризационного вращателя и поляризатора. В качестве поляризационного вращателя обычно используют волновую пластинку или электрооптический модулятор, которые поворачивают плоскость входной поляризации. Далее луч, проходя через поляризатор, разделяется на два отдельных луча с S- и P- поляризацией. Отношение интенсивности между входным и выходным лучами контролируется с помощью волновой пластинки или электрооптического модулятора. Электрооптический модулятор может повернуть поляризацию входного луча на 90° в пределах десятых долей пикосекунд [2]. Это позволяет применять его в тех случаях, когда требуется получить одиночные лазерные импульсы или необходимо использовать схему генератора с модуляцией добротности. Однако такое управление происходит за счет включения в систему управления сложного контроллера, который должен выдерживать напряжения в несколько киловольт. Таким образом, электрооптический модулятор используется только для приложений, где обязательным условием является требование быстрого переключения между состояниями S- и P-поляризации. Если в качестве поляризационного вращателя используется волновая пластинка (рис.2), то ее можно вращать вручную, но это замедляет пово-

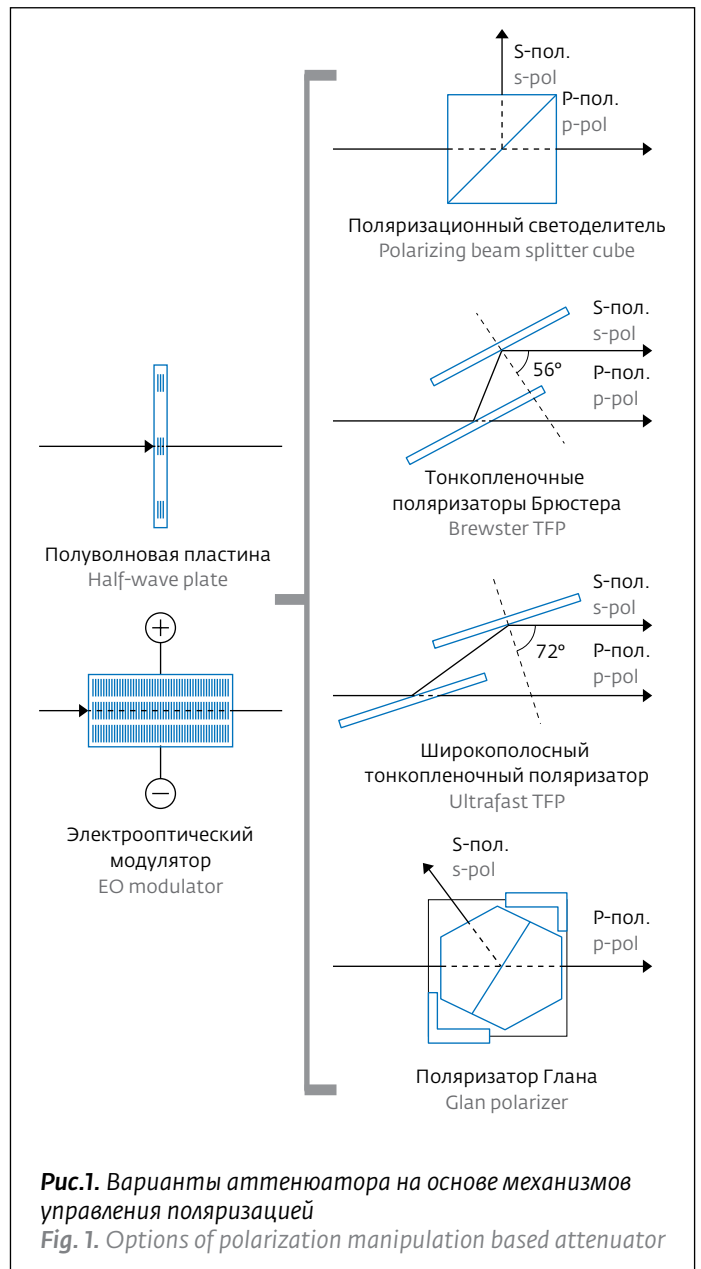
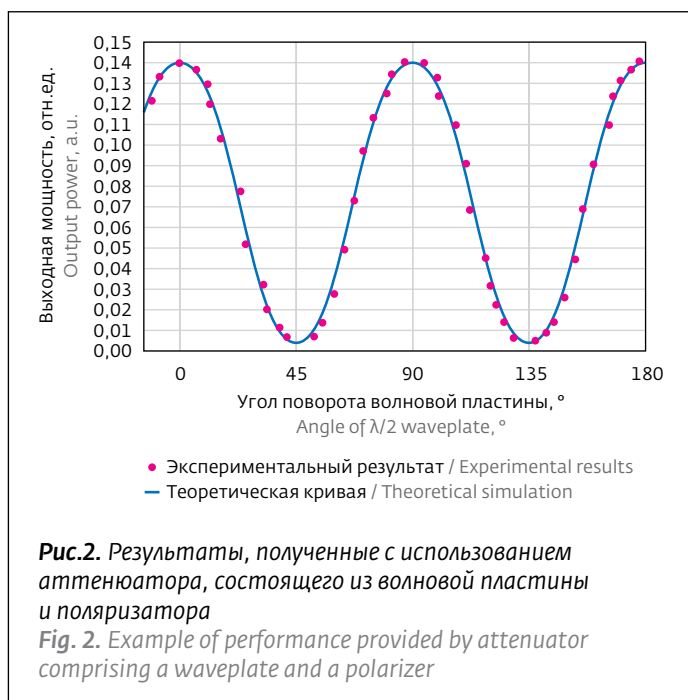


Рис.1. Варианты аттенюатора на основе механизмов управления поляризацией

Fig. 1. Options of polarization manipulation based attenuator

layer allowing continuously variable density a long filter cross-section.

Laser sources with polarized output provide subtle attenuation option – output power control through manipulation of the polarization (Fig.1). Such method incorporates polarization rotator and polarizer. Polarization rotator is usually a waveplate or electrooptic (EO) modulator that rotates input polarization. Then the beam passes onto the polarizer, where orthogonal polarizations S and P are separated into two separate S and P polarized beams. Intensity ratio between the two beams is controlled by polarization rotator which can be either a waveplate or an EO modulator. The EO modulator can

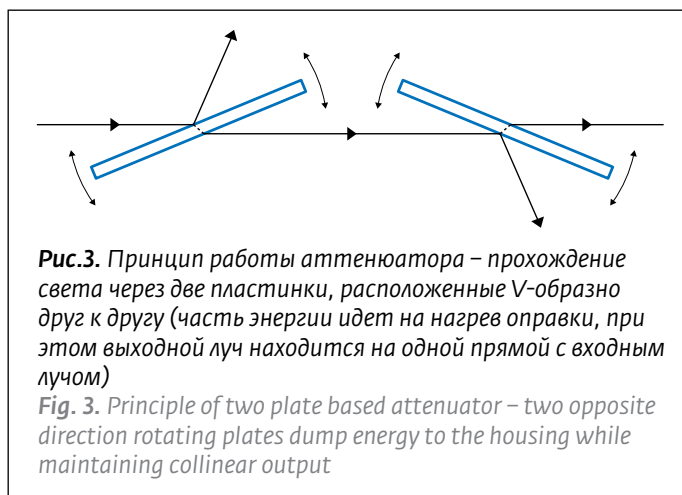


рот поляризации. Однако существует механический способ, который может обеспечить поворот между S- и P-состояниями в пределах нескольких сотых долей миллисекунды. Существует огромное разнообразие поляризационной оптики, коммерчески доступной на рынке, что позволяет собрать аттенюатор с определенными особенностями для конкретных приложений. Например - поляризационный светоделитель, он служит для разделения пучка на лучи с S- и P-поляризацией, распространяющиеся под углом 90°. Наоборот, если требуется получить параллельные лучи с S- и P-поляризацией, то можно использовать два параллельных поляризатора, имеющих грани с углом Брюстера. Для фемтосекундных лазеров - широкополосная оптика, к примеру, ахроматические волновые пластины или поляризаторы с углом падения в 72° будут способствовать сохранению длительности импульса. Для средней ИК-области подходят соответствующие волновые пластины и призмы Глана, изготовленные из вандата иттрия, а также из теллура, выполняющие роль поляризаторов. Аттенюаторы, основанные на принципе управления поляризацией, имеют многочисленные преимущества по сравнению с другими методами управления мощностью лазерного излучения: широкий диапазон ослабления излучения от 0,04 до 99%, и, что является не менее важным, - порог разрушения оптики высок и составляет плотность мощности 20 Дж/см² [3]. Однако подчеркнем, что данный

turn input beam polarization by 90° within tenths of picosecond [2], which makes it applicable in pulse picking/cavity dumping applications, but this comes at cost of complicated controller which must cope with voltage of several kV, thus it is used only for applications where fast open-shut rates are mandatory. If the waveplate is used as polarization rotator (Fig.2), it must be physically turned which slows down the polarization rotation but such scheme can be realized in both - manual and motorized control and the latter could provide MIN-MAX attenuation within few hundredths of a millisecond. Polarizing optics come in a huge variety readily available on the market, which allows to assemble attenuators with distinct features serving particular applications.

For instance: separation of 90° angle between S and P polarizations can be realized by using polarizing beamsplitter cube, if parallel output beams are needed, two parallel Brewster polarizers could be used, for femtosecond lasers - broadband optics like achromatic waveplates and "ultrafast" 72° angle of incidence polarizers would help to preserve pulse duration, mid - IR region can be accessed by employing appropriate materials and optics production technologies, e.g. mid-IR waveplates and Yttrium orthovanadate (YVO₄) or Tellurite (TeO₂) Gian polarizers. Attenuators, operating under polarization control principle provide numerous advantages over other methods, firstly - the dynamic attenuation range 0.04-99% can be achieved, and no less important is laser damage threshold of the optics which can be up to 20 J/cm² [3]. However, only polarized sources can be managed in this principle, which means, that unpolarised lasers need to be fitted with another power control solution.

Unpolarised laser sources also have several options for attenuation. Attenuator principle relying on





метод управления мощностью подходит только для лазеров с поляризованным излучением.

Источники с неполяризованным светом также имеют несколько вариантов, с помощью которых можно ослабить их излучение. Ниже будет рассмотрен принцип аттенюатора, основанный на френелевском отражении. Принимая во внимание, что мощность определяется как квадрат амплитуды ($P=A^2$), получаем, что при отражении излучения на границе двух сред мощность отраженного излучения на границе раздела между двумя прозрачными однородными средами определяется следующими уравнениями [4]:

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2;$$

$$R_p = \left(\frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2,$$

где R_s и R_p – мощность отраженного излучения с S- и P-поляризацией, n_1 и n_2 – показатели преломления сред по разные стороны от границы раздела, θ_1 – угол падения, θ_2 – угол преломления.

Данный аттенюатор состоит из двух стеклянных пластин без покрытия, расположенных V-образно друг к другу (рис.3). Так как фре-

Fresnel reflection will be reviewed. Knowing the Power – Amplitude relation $P=(A)^2$ reflected power at the interface between two transparent homogeneous media is defined by equations [4]:

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2;$$

$$R_p = \left(\frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2,$$

were R_s and R_p is reflected power of S and P polarizations, n_1 and n_2 are refractive indices of intersecting media, θ_1 , is angle of incidence, θ_2 is angle of refraction.

Such attenuator comprises two uncoated glass plates which are positioned in a chevron configuration (Fig.3).

As Fresnel reflections are dependent on angle of incidence, changing the angle between the plates also changes the power of transmitted radiation.

Glass plates being uncoated determine that laser induced damage threshold of the attenuator is equal to damage threshold of the glass material which makes it, in principle, the most damage resistant external attenuator. Another advantageous feature of this product is operation in broadband spectral range,

нелевское отражение зависит от угла падения излучения, то, изменяя угол между пластинами, можно добиться изменения мощности проходящего излучения. Так как пластины не имеют покрытия, то порог их повреждения лазерным излучением определяется как порог разрушения стекла, из которого они изготовлены, что делает данный attenuator наиболее устойчивым к разрушению лазером. Другим отличительным признаком этой конструкции является ее использование в широком диапазоне спектра. Таким образом, существует возможность управлять мощностью источников с широким спектром излучения. Тем не менее, основным недостатком такого attenuator является то, что он не может использоваться со сверхбыстрыми источниками из-за относительно толстой дисперсионной среды, которая приводит к временному удлинению импульсов. Другим недостатком является потеря мощности излучения при прохождении через пластины. Так как эффекта Френелевского отражения избежать невозможно (к примеру, УФ-кремниевые пластины отражают более 3% падающего излучения на длине волны 1064 нм под прямым углом падения (рис.4) [5]), то максимальное пропускание такой системы составляет обычно не более 90%. Также стоит отметить, что при прохождении через attenuator луч становится поляризованным, и чем выше ослабление мощности, тем больше доля Р-поляризации излучения на выходе.

Таким образом, внешними устройствами управления мощностью лазерного излучения являются:

- **Устройства, не чувствительные к поляризации падающего излучения:**
 - различные нейтральные фильтры,
 - attenuatorы, основанные на Френелевском отражении.
- **Устройства, чувствительные к поляризации падающего излучения:**
 - электрооптический модулятор + поляризатор,
 - волновая пластинка + поляризатор.

Компания Altechna предлагает следующие attenuatorы с плавной регулировкой мощности:

- круговые нейтральные фильтры,
- волновая пластинка с ручным управлением + поляризатор,
- моторизованная волновая пластина + поляризатор.

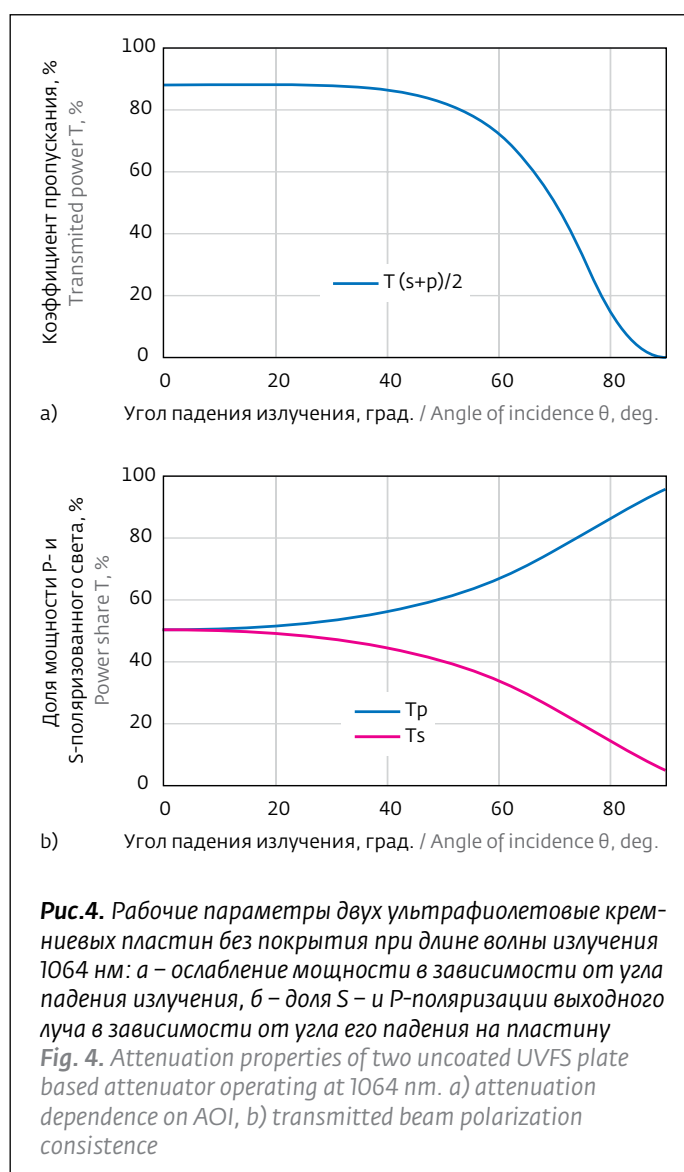


Рис.4. Рабочие параметры двух ультрафиолетовые кремниевых пластин без покрытия при длине волны излучения 1064 нм: а – ослабление мощности в зависимости от угла падения излучения, б – доля S – и P-поляризации выходного луча в зависимости от угла его падения на пластину
Fig. 4. Attenuation properties of two uncoated UVFS plate based attenuator operating at 1064 nm. a) attenuation dependence on AOI, b) transmitted beam polarization consistence

which means that even the power of supercontinuum sources can be effectively controlled by the solution. However, the main disadvantage of the product is that it cannot be used with ultrafast laser sources due to relatively thick dispersive media which leads to pulse temporal elongation. Another drawback is that the minimum losses of the setup are rather high. As Fresnel reflections cannot be avoided (for instance UVFS reflects >3% at 1064 nm at normal incidence (Fig.4) [5]) thus the maximum transmission of such system is usually no more than 90%. Also it is worth mentioning, that the beam after this attenuator becomes polarized and the higher the attenuation, the more dominant is the P polarization at the output.

In summary, external laser output control units are:

Компания "ОЭС Спецпоставка" является официальным представителем компании Altechna в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. photonics.gsfc.nasa.gov/tva/meldoc/sources1.pdf
2. www.rp-photonics.com/cavity_dumping.html?s=ak
3. www.altechna.com/lidt
4. www.rp-photonics.com/fresnel_equations.html
5. refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson

- **Incident polarization insensitive:**
 - Variable neutral density filters
 - Fresnel reflections based attenuator
- **Incident polarization sensitive:**

- Electro optical modulator+ polarizer
- Waveplate + polarizer

Altechna offers the following continuously variable attenuation solutions:

- Circular Variable Neutral Density Filters
- Manually variable waveplate + polarizer attenuators
- Motorized wavepalte + polarizer attenuators

О РАЗВИТИИ ЭКСПЕРИМЕНТА "СФЕРА-АНТАРКТИДА"

Проект "СФЕРА-Антарктида" создается с целью исследования энергетического спектра и химического состава космических лучей в области сверхвысоких энергий – элементарных частиц и ядер атомов, образовавшихся в галактических и внегалактических источниках. Проект разработан на базе успешно прошедшего эксперимента на озере Байкал (рис.1), который проводился в рамках проекта "СФЕРА" (<http://sphere.sinp.msu.ru/>). Эксперимент был направлен на исследования ШАЛ (широкий атмосферный ливень – "ливень" вторичных субатомных частиц (преимущественно электронов), образующийся в результате множественных каскадных реакций в земной атмосфере. Экспериментальная установка СФЕРА-2 представляет собой оптическую систему, состоящую из сферического зеркала диаметром 1,5 м с корректирующей диафрагмой и мозаики из 109 ФЭУ, расположенной на фокальной поверхности зеркала. Установка поднимается на привязном аэростате безлунной зимней ночью

над покрытой снегом поверхностью земли и регистрирует черенковское излучение ШАЛ, отраженное от снега. В настоящее время подъемы установки СФЕРА-2 с помощью привязного аэростата проводятся над покрытой снегом ледовой поверхностью озера Байкал на высоту до 1 км.

Для выполнения проекта "СФЕРА-Антарктида" создается установка "СФЕРА-А" – единственный в РФ и уникальный с точки зрения применяемой методики измерений инструмент для поиска и изучения источников первичных космических лучей (ПКЛ) в Южном полушарии небесной сферы Земли, которое недоступно для наблюдения с территории России.

Частота прихода таких событий настолько мала, что единственным методом их изучения является регистрация вспышек света, возникающих при попадании первичной частицы в атмосферу Земли. Измерения проводятся только в условиях ясной и безлунной ночи из-за малой яркости этих вспышек. Наблюдательный климат в Антарктиде – долгая полярная ночь, чистая атмосфера, устойчивые циркулярные воздушные потоки и наличие развитой инфраструктуры полярных станций РФ – позволяет провести задуманный эксперимент. Установка "СФЕРА-А" (рис.2) способна регистрировать два типа свечения: флуоресцентный свет и отраженный от снежной поверхности черенковский свет. Флуоресцентный свет генерируется за счёт ионизации молекул атмосферы от каскада вторичных частиц. Каскад образуется в результате взаимодействия первичной частицы с частицами земной атмосферы.

Черенковский свет возникает за счёт того, что частица каскада движется со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в атмосфере. При этом флуоресцентный свет излучается изотропно и несет информацию о форме

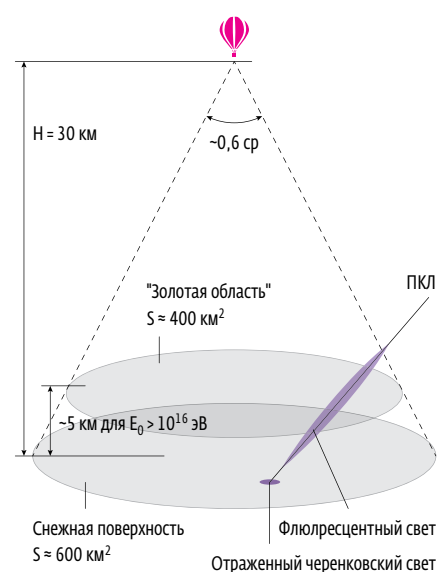


Рис.2. Схема эксперимента "СФЕРА-Антарктида"

каскада вторичных частиц, что позволяет определить тип первичной частицы (протон, ядро железа и т.п.). Черенковский свет излучается направленно вдоль оси развития каскада и дает возможность оценивать энергию и направление прихода первичной частицы. "СФЕРА-А" может эффективно регистрировать оба типа светового излучения одним детектором.

Детектирующим элементом установки является сверхчувствительная и сверхбыстрая видеокамера, которая способна регистрировать единицы фотонов с частотой до 10 млн. кадров в секунду. Матрица детектора состоит из ~3300 кремниевых фотонных элементов. Установка поднимается на аэростате на высоту ~30 км и регистрирует вспышки от попадающих в атмосферу частиц.

По материалам заметки В. Желит,
АНИ "ФИАН-информ"

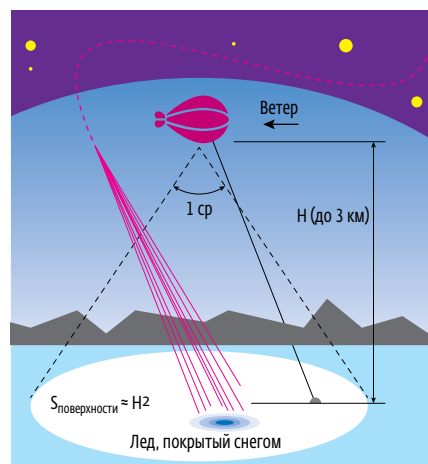


Рис.1. Схема эксперимента на озере Байкал