

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА РАСТВОРАХ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СВЕТОПРИЕМНИКОВ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

[А. Б. Басаев], Г. А. Чунтонов

Усиление света в широкой спектральной полосе в растворах органических красителей может быть использовано в астрономии для увеличения эффективности приемников в видимой и ближней ИК областях.

Broad band light amplification in organic dyes may be used in astronomy for increasing optical detectors' efficiency in visible and IR regions.

Применяемые в астрономии приемники излучения в диапазоне длин волн  $0.6 \div 2$  мкм имеют либо весьма малую ( $10^{-5} \div 10^{-3}$ ) квантовую эффективность при незначительном уровне шума (ФЭУ, фотоэмульсия), либо высокую квантовую эффективность в сочетании с большими внутренними шумами (приборы с внутренним фотоэффектом). Поэтому приходится увеличивать время накопления сигнала для регистрации предельно слабых световых потоков. Применение ЭОП не является радикальным средством, поскольку из-за квантовых флуктуаций точность измерения пропорциональна  $M^{-1/2}$ , где  $M$  — число сигнальных фотонов. Для уменьшения времени накопления необходимо увеличить поток фотонов, поступающий на вход фотоприемника. В настоящей работе рассматривается возможность применения для этой цели квантового усилителя (КУ) на растворах органических красителей. Как показано ниже, применение КУ эквивалентно увеличению квантовой эффективности фотодетектора в  $K$  раз ( $K$  — коэффициент усиления КУ).

На рис. 1 приведена упрощенная схема уровней энергии молекулы органического красителя. Основное и возбужденное состояния являются сильно размытыми из-за наличия большого числа колебательных и вращательных подуровней, образующих «континуум». Внешний источник света, например лазер, индуцирует переходы  $A \rightarrow B$ , создавая инверсную заселенность рабочих уровней  $S_0$  и  $S_1$ . Сигнальный фотон соответствующей частоты, попадая в среду, содержащую возбужденные молекулы, индуцирует переходы  $B \rightarrow a$ . При этом возникают тождественные ему фотоны, которые поступают на вход

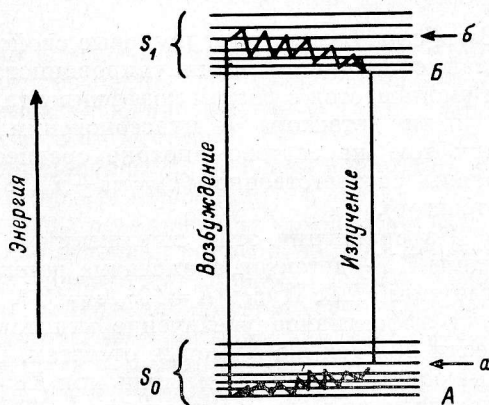


Рис. 1. Схема уровней энергии молекулы органического красителя.

фотодетектора. Коэффициент усиления пропорционален разности заселенностей верхнего и нижнего рабочих уровней и времени пролета фотона через усиливающую среду. Спектральная полоса усиления определяется шириной рабочих уровней и для молекул органических красителей составляет несколько сот ангстрем.

Характерными особенностями КУ являются статистический характер усиления и наличие внутреннего шума, обусловленного спонтанным излучением усиливающей среды.

Рассмотрим процесс детектирования пуассоновского потока фотонов с параметром  $\mu$  системой КУ + детектор. Для этого введем следующие обозначения:

вероятность поступления на вход системы  $m$  фотонов  $P_m = \mu^m e^{-\mu} / m!$ ;

вероятность появления на выходе КУ  $n$  фотонов при появлении на его входе  $m$  фотонов  $P_{mn}$ ;

вероятность появления  $l$  фотоэлектронов на выходе детектора при попадании на его вход  $n$  фотонов

$$P_{nl} = n! \varepsilon^l (1 - \varepsilon)^{n-l} / (n - l)!$$

(шумом детектора здесь пренебрегаем по сравнению с шумом КУ). Величина  $\varepsilon$  имеет смысл квантовой эффективности.

Вероятность появления  $l$  фотоэлектронов на выходе детектора определяется следующим очевидным выражением:

$$P_l = \sum_{m, n} P_m P_{mn} P_{nl}.$$

Используя результаты работ [1, 2], а также свойства полиномов Лагерра [3], можно легко получить следующие выражения для среднего числа и дисперсии фотоэлектронов на выходе системы:

$$\langle l \rangle \approx \mu \varepsilon K + \varepsilon KL, \quad \sigma^2 \approx \langle l \rangle, \quad K \varepsilon \ll 1, \quad K \gg 1.$$

Величина  $L$  описывает шумовые свойства КУ и равна отношению вероятностей спонтанного и индуцированного излучений. В красителях  $L \leq 10^3$  и уменьшается с ростом коэффициента усиления.

Для детектора с пуассоновским распределением шумовых отсчетов при том же световом потоке среднее число и дисперсия фотоэлектронов равны соответственно  $\langle l \rangle = \mu \varepsilon + \mu_0$ ;  $\sigma^2 = \langle l \rangle$  ( $\mu_0$  — среднее число шумовых отсчетов).

Из сравнения этих выражений с полученными выше следует, что система КУ + детектор аналогична детектору с квантовой эффективностью  $K\varepsilon$  и шумом  $\varepsilon KL$ . Пусть  $K = 10^2$ ,  $\varepsilon = 10^{-4}$ ,  $L = 10^3$ ,  $\mu_0 = 10$ , тогда применение КУ даст эффективное увеличение квантовой эффективности в сто раз практически при тех же шумовых отсчетах. Следует особо отметить, что приведенные оценки справедливы лишь при  $K\varepsilon \ll 1$ . С ростом  $\varepsilon$  выигрыш резко уменьшается, а при  $\varepsilon > 0.5$  применение КУ с детектором описанного типа вообще не имеет смысла.

Однако для фотоприемников с внутренним фотоэффектом, ограниченных тепловыми шумами (не зависящими от величины сигнала), применение КУ также позволяет сократить время накопления сигнала. В этом случае последетекторное усиление мощности в ФЭУ заменяется на преддетекторное усиление в КУ. Это в принципе позволяет усилить квантовоограниченный сигнал до уровня тепловых шумов детектора. Подробный анализ такого применения КУ дан в работе [4].

Идея применения квантового усилителя для повышения эффективности приемников излучения рассматривалась ранее (например, [2, 4]). Однако возможность КУ ограничивалась весьма узкой ( $\sim 1$  ГГц) спектральной полосой и отсутствием перестройки полосы усиления по спектру, что делало его непригодным для астрономических наблюдений.

В настоящее время появилась возможность устранить эти недостатки путем использования в качестве усиливающей среды растворов органических красителей [5]. Уже теперь при мощности возбуждения порядка нескольких ватт можно получить показатель усиления до  $0.1 \text{ см}^{-1}$ . Узкая ( $10 \text{ \AA}$  и менее) полоса усиления может перестраиваться в пределах сотен ангстрем.

Коэффициент усиления можно увеличивать, вводя положительную обратную связь при помощи полупрозрачных зеркал, расположенных у торцов кюветы с активной средой (рис. 2). Перестройка может производиться

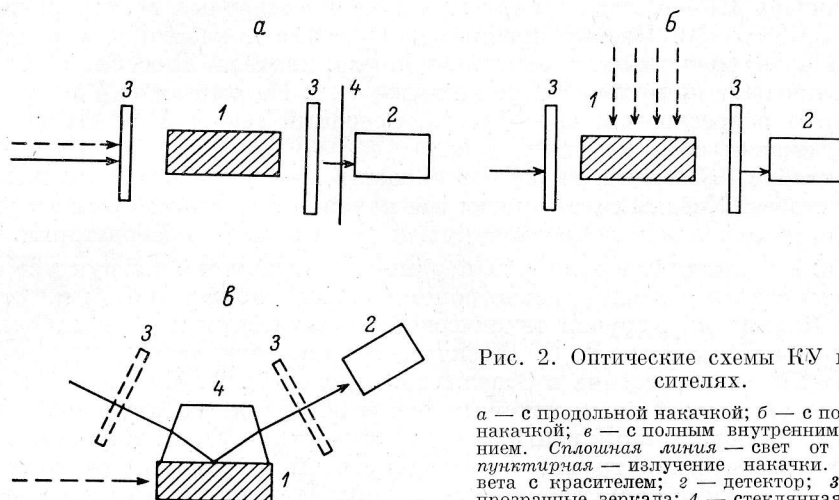


Рис. 2. Оптические схемы КУ на красителях.

*a* — с продольной накачкой; *б* — с поперечной накачкой; *в* — с полным внутренним отражением. *Сплошная линия* — свет от объекта; *пунктирная* — излучение накачки. 1 — кювета с красителем; 2 — детектор; 3 — полупрозрачные зеркала; 4 — стеклянная призма.

путем поворота дифракционной решетки, заменяющей одно из зеркал такого резонатора.

Некоторые принципиальные схемы построения усилителей даны на рис. 2. Схема с поперечной накачкой, по-видимому, предпочтительней из-за отсутствия фильтра излучения возбуждения. Особенно интересна схема, использующая явление усиления света при полном внутреннем отражении от среды с отрицательным показателем поглощения (рис. 2, *в*). В ней можно получить усиление света примерно в 10 раз при одном отражении.

Таким образом, КУ света на растворах органических красителей, обладая достаточным усилением и сравнительно широкой полосой, могут в сочетании с обычно используемыми астрономическими светоприемниками обеспечить существенный выигрыш во времени получения спектров астрономических объектов со средним и низким разрешением и повысить проникающую способность светоприемной аппаратуры в спектральном диапазоне  $0.7 \div 2.0 \text{ мкм}$ . Затраты на исследования в этой области оправдываются хорошими перспективами (продвижение спектрального диапазона в среднюю и дальнюю ИК области спектра, усиление изображений и пр.).

#### Литература

1. Shimoda K., Takahashi H., Townes C. H. Fluctuations in Amplification of Quanta with Application to Maser Amplifiers. — J. Phys. Soc. Japan, 1957, 12, No. 6, p. 686—700.
2. Конарев В. П. и др. Пороговые характеристики приемников с оптическими квантовыми усилителями. — Квантовая электроника, 1972, № 7, с. 36—45.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., «Наука», 1973, 831 с.
4. Росс М. Лазерные приемники. М., «Мир», 1969, 520 с.
5. Snavely V. B. Flash Lamp Pumped Dye Lasers. — Proc. Inst. electr. electron Eng., 1969, 57, No. 8, p. 32—51.

Ноябрь 1974 г.