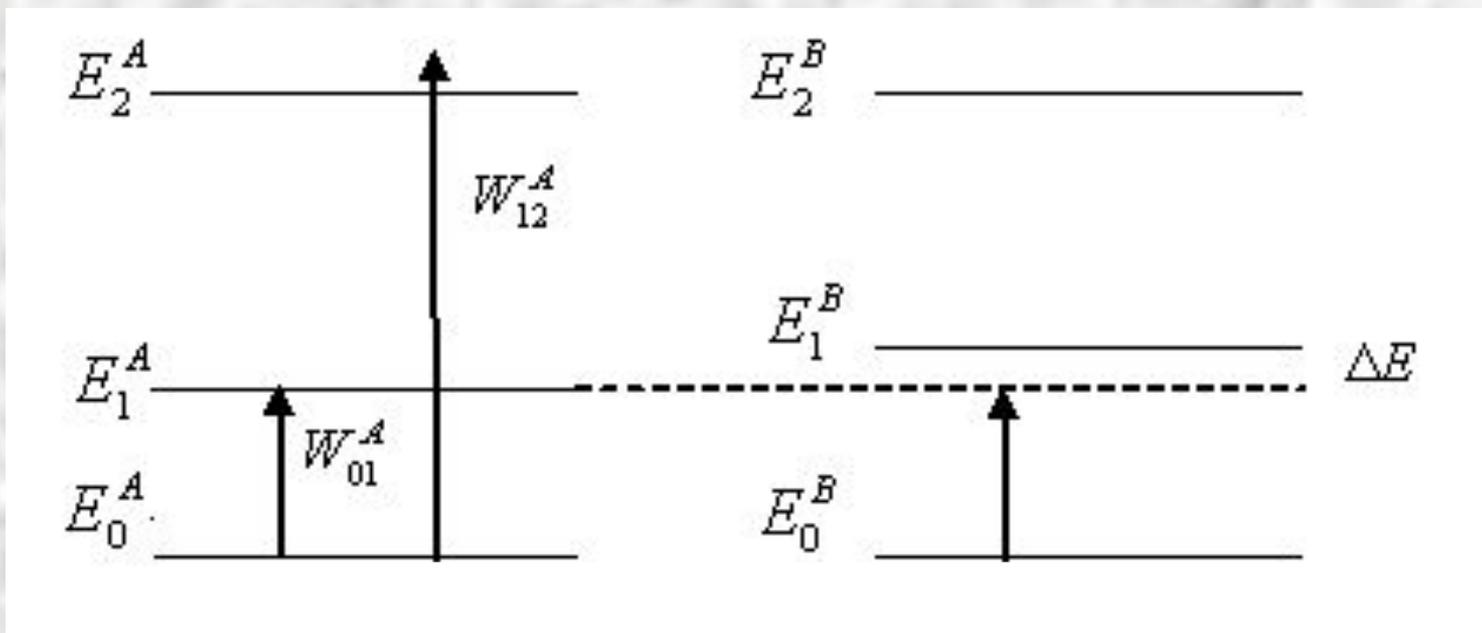


# Лазерное разделение изотопов

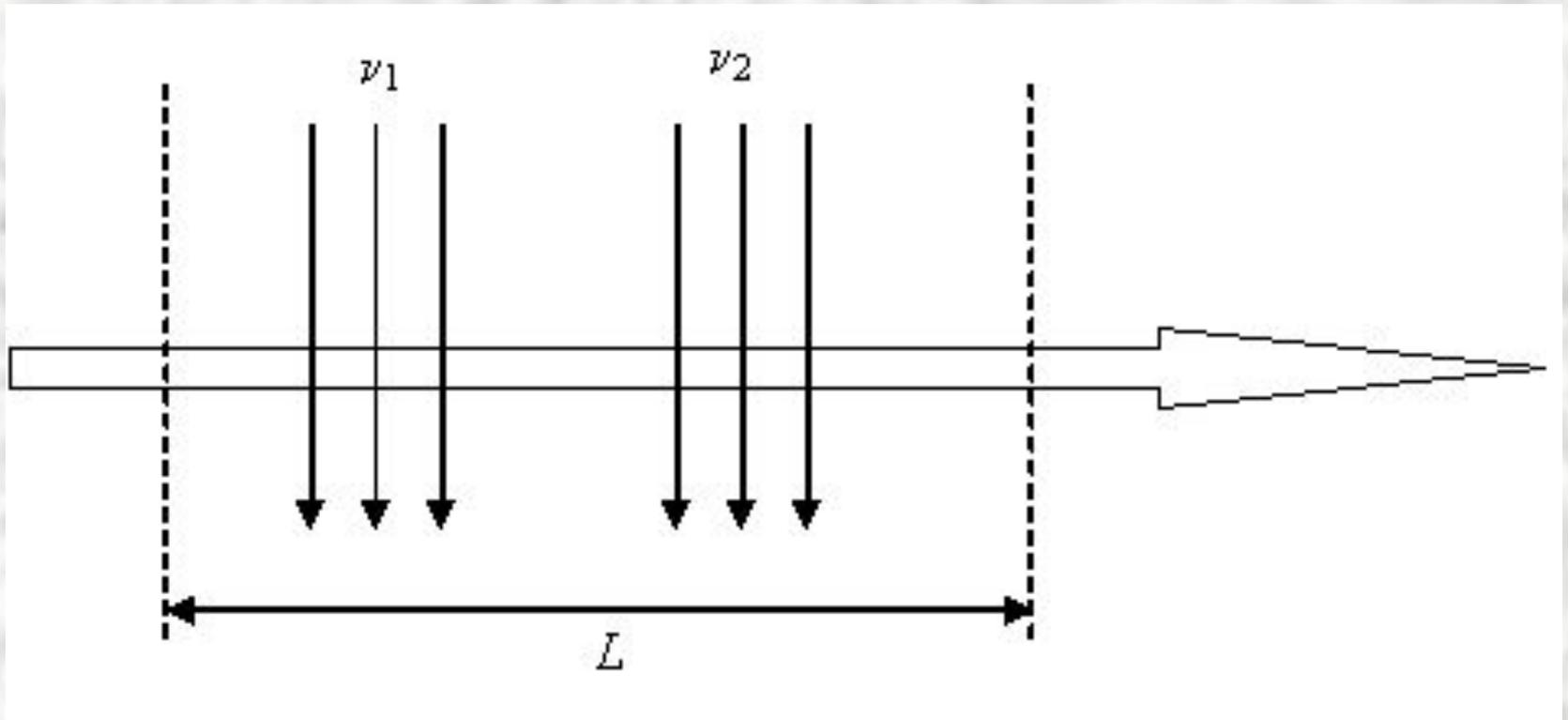
Лазерное разделение изотопов - возможность селективного возбуждения лазерным излучением атомов и молекул определенного изотопного состава

## Двухступенчатая селективная фотоионизация



Излучением первого лазера возбуждается уровень 1 изотопа А. Затем излучением второго лазера этот изотоп ионизируется, после чего выводится из смеси различными методами

## Лазерное разделение изотопов



**Пучок атомов влетает с определенной скоростью  $v$  в область взаимодействия с лазерным излучением, длина которой равна  $L$  вдоль по поток**

**Пучок последовательно взаимодействует с излучением двух лазеров, в результате чего на выходе из области взаимодействия концентрация ионов нужного изотопа увеличивается**

## Лазерное разделение изотопов

Мера эффективности:  $\eta = \frac{N_2}{N_1}$

$N_1$  - концентрация атомов нужного изотопного состава в начале потока

$N_2$  - концентрация атомов нужного изотопного состава на выходе

Время пролета атомов через область взаимодействия с лазерным излучением:

$$\tau_0 = L / v$$

Это время должно быть больше по сравнению со временем жизни возбужденного 1-го уровня

Вероятность индуцированных переходов  $0 \rightarrow 1$ :

$$W_{01}^A = B_{01} \rho_1$$

$B_{12}$  – коэффициент Эйнштейна для соответствующего перехода

$\rho_1$  - плотность мощности излучения первого лазера, то вероятность индуцированных переходов  $0 \rightarrow 1$

## Лазерное разделение изотопов

$$\begin{array}{ccc} W_{01}^A \tau_1 \lll 1 & \searrow & \\ \eta = 1 - \exp(-\tau_0 / \tau) & \rightarrow & \tau^{(1)} = \frac{1}{W_{01}^A W_{12}^A \tau_1} \\ W_{01}^A \tau_1 \ggg 1 & \nearrow & \end{array}$$

$\tau^{(1)}$  — эффективное время жизни 1-го уровня изотопа А

$$W_{01}^A \tau_1 \ggg 1 \rightarrow \tau^{(2)} = \frac{2}{W_{12}^A} \ggg \tau^{(1)}$$

$\eta=1$  - ионизация всех атомов нужного изотопа, изначально присутствующих в смеси

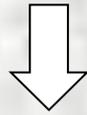
Это значение достигается в предельном случае, когда:

$$\tau_0 \ggg \tau$$

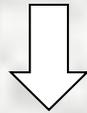
# Лазерное разделение изотопов

## Причины уменьшения эффективности

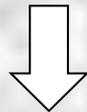
1. Энергетические состояния имеют конечную ширину (столкновительное и доплеровское уширение)



Ширина линии поглощения на переходе  $0 \rightarrow 1$  может оказаться сравнимой по порядку с величиной  $\Delta E$



Наряду с возбуждением 1-го уровня изотопа А излучением с частотой  $\nu_1$  частично будет возбуждаться и 1-й уровень и изотопа В



Селективность метода ухудшится, поскольку под воздействием излучения с частотой  $\nu_2$  изотоп В также будет ионизироваться

# Лазерное разделение изотопов

## Причины уменьшения эффективности

### 2. Резонансная передача энергии



### 3. Резонансная перезарядка



Без учета резонансной передачи энергии и резонансной перезарядки значение эффективности близкое к 1 может быть достигнуто при скорости потока порядка  $10^4$  см/с, длине области взаимодействия 2-3 см и при плотности мощности первого лазера порядка сотен милливатт на  $1\text{ см}^2$

При учете резонансной передачи энергии и резонансной перезарядки близкое к 1 значение эффективности также может быть достигнуто, однако при этом существенно снижается производительность метода, что является существенным ограничением для его применения в промышленных масштабах

## Лазерное разделение изотопов

**Многоступенчатая фотоионизация – излучение нескольких лазеров последовательно переводит атомы нужного изотопа в возбужденные состояния. На последнем шаге атом ионизируется**

**Столкновение возбужденного лазерным излучением изотопа с частицей буферного атома в скрещенных пучках, в результате которого происходит ионизация:**



**Ионизация возбужденных изотопов в сильных электростатических полях: излучением лазера (или нескольких лазеров) возбуждаются состояния, близкие к энергии ионизации. Прикладываемое затем электрическое поле так меняет энергетические состояния атома, что возбужденное лазером состояние попадает в непрерывный спектр, и атом ионизируется**

**Многоступенчатая селективная фотоионизация может быть использована для разделения изотопов как атомов, так и молекул**

## **Лазерное разделение изотопов**

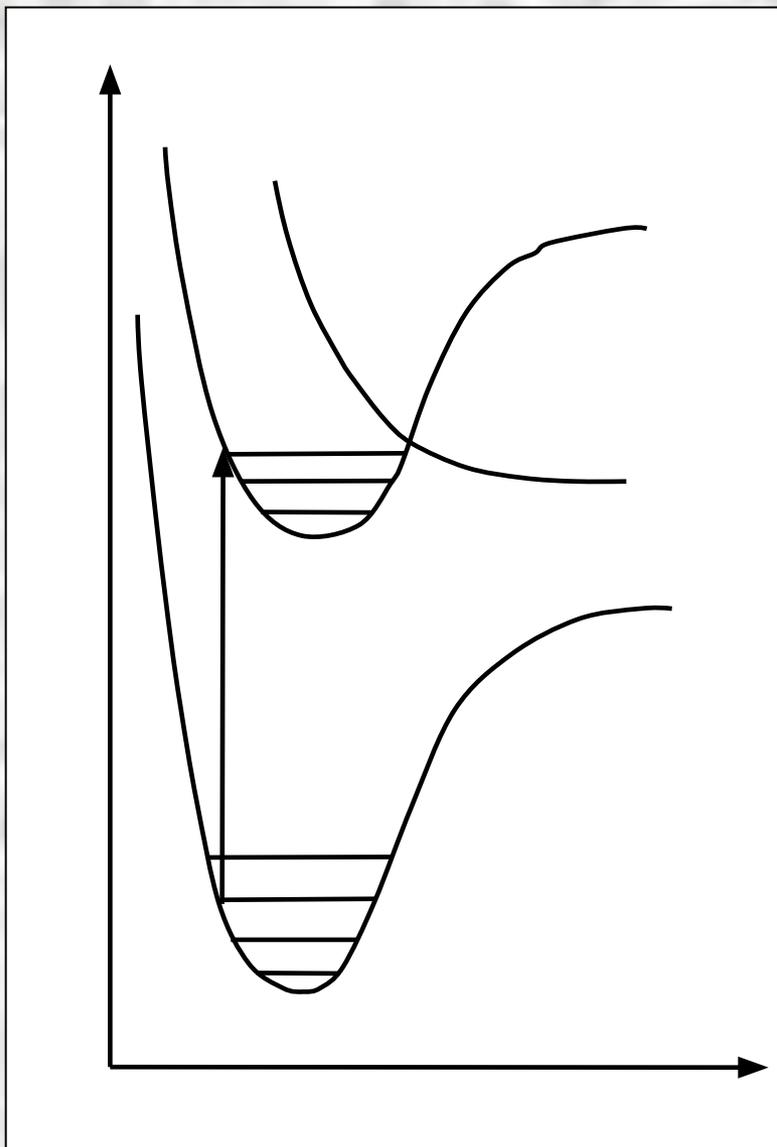
**Фотодиссоциация молекулы - использование только одного ИК-лазера, частота излучения которого резонансна первому колебательному кванту молекулы**

**Объяснение: выход излучения из резонанса по мере поглощения молекулами квантов света компенсируется конечной шириной энергетических состояний. Расстояние между состояниями может быть сравнимо или даже меньше ширины этих состояний, что приводит к квазинепрерывным полосам поглощения**

**Высокая селективность метода достигается при импульсном возбуждении, когда длительность импульса меньше времен газокинетических столкновений - метод мгновенной диссоциации**

**Необходимым условием для того, чтобы метод имел высокую эффективность, является требование, чтобы величина изотопического сдвига была большей по сравнению с величиной ангармонизма**

## Лазерное разделение изотопов



**Если возбужденное связанное электронное состояние молекулы пересекается с отталкивательным, то вероятность преддиссоциации велика в небольшом диапазоне колебательных квантовых чисел возбужденного электронного состояния**

**Это позволяет изотопически-селективно возбуждать нужный диапазон колебательных состояний при облучении смеси изотопов монохроматическим лазерным излучением**

**Скорости преддиссоциации существенно превышают скорости колебательной релаксации, что позволяет добиваться высокой эффективности метода**

# Лазерное разделение изотопов

## Одноступенчатые методы

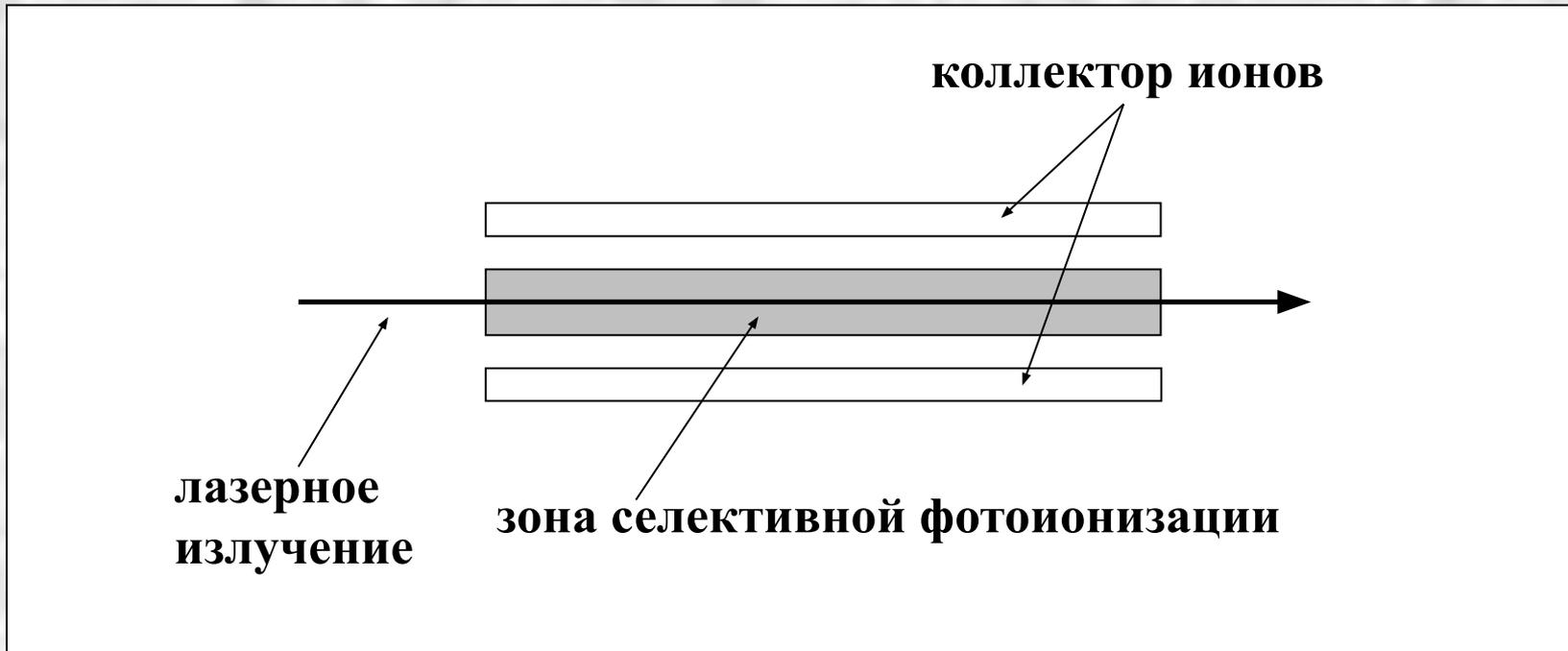
**1. Сначала излучением лазера нужный изотоп переводится в возбужденное состояние. Далее возбужденный изотоп вступает в химическую реакцию с неким веществом (если изотоп находится в основном состоянии, химическая реакция не идет) и переходит в другое агрегатное состояние**

**2. Одноступенчатая фотопрдиссоциация: если возбужденное связанное электронное состояние молекулы пересекается с отталкивательным, то вероятность прдиссоциации велика в небольшом диапазоне колебательных квантовых чисел возбужденного электронного состояния. Это позволяет изотопически-селективно возбуждать нужный диапазон колебательных состояний при получении смеси изотопов монохроматическим лазерным излучением**

## Пучковые методы

**Химические реакции происходят в скрещенных молекулярных пучках. В пучках практически исключаются все столкновения, кроме столкновений между частицами-реагентами химических реакций**

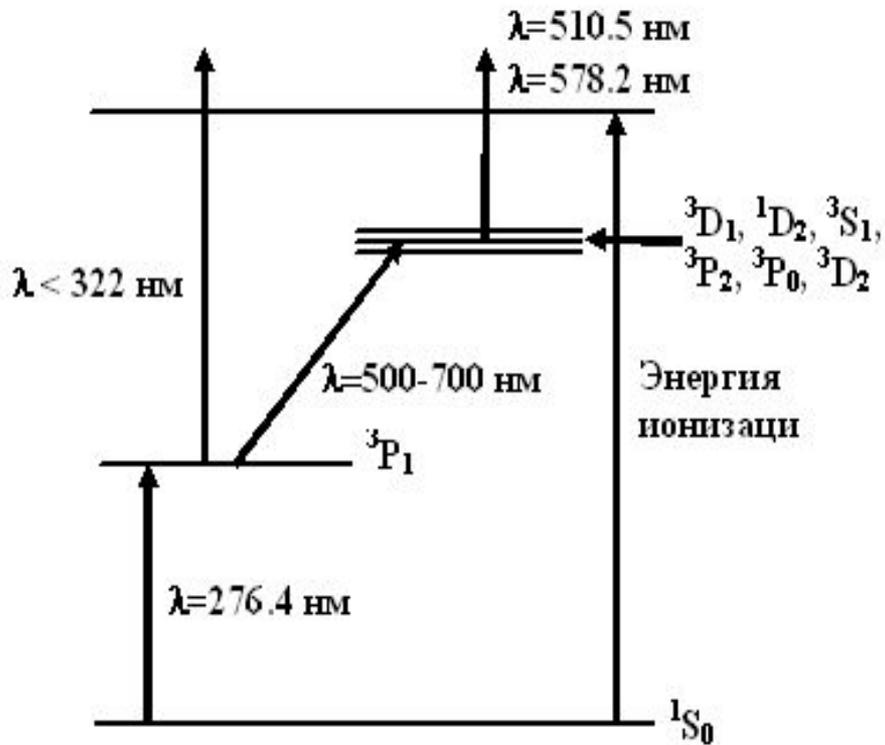
## Лазерное разделение изотопов



**Сначала получают пар смеси изотопов из твердой фазы. Затем полученный пар ионизируется излучением нескольких лазеров. Далее ионизированные атомы экстрагируются из смеси с помощью электрического поля (или с помощью комбинации электрического и магнитного полей) и переводятся в ту либо иную форму с помощью разнообразных химических методов**

# Лазерное разделение изотопов

## Схема селективной фотодиссоциации палладия



## Схема селективной фотодиссоциации иттербия

