

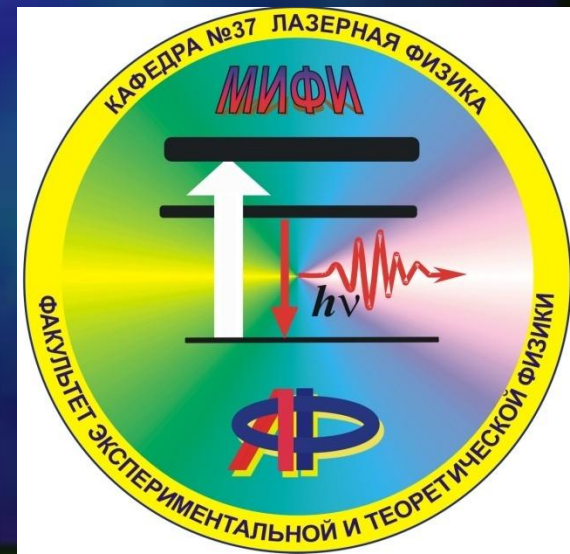
Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

ФАКУЛЬТЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Кафедра №37
«ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА»

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

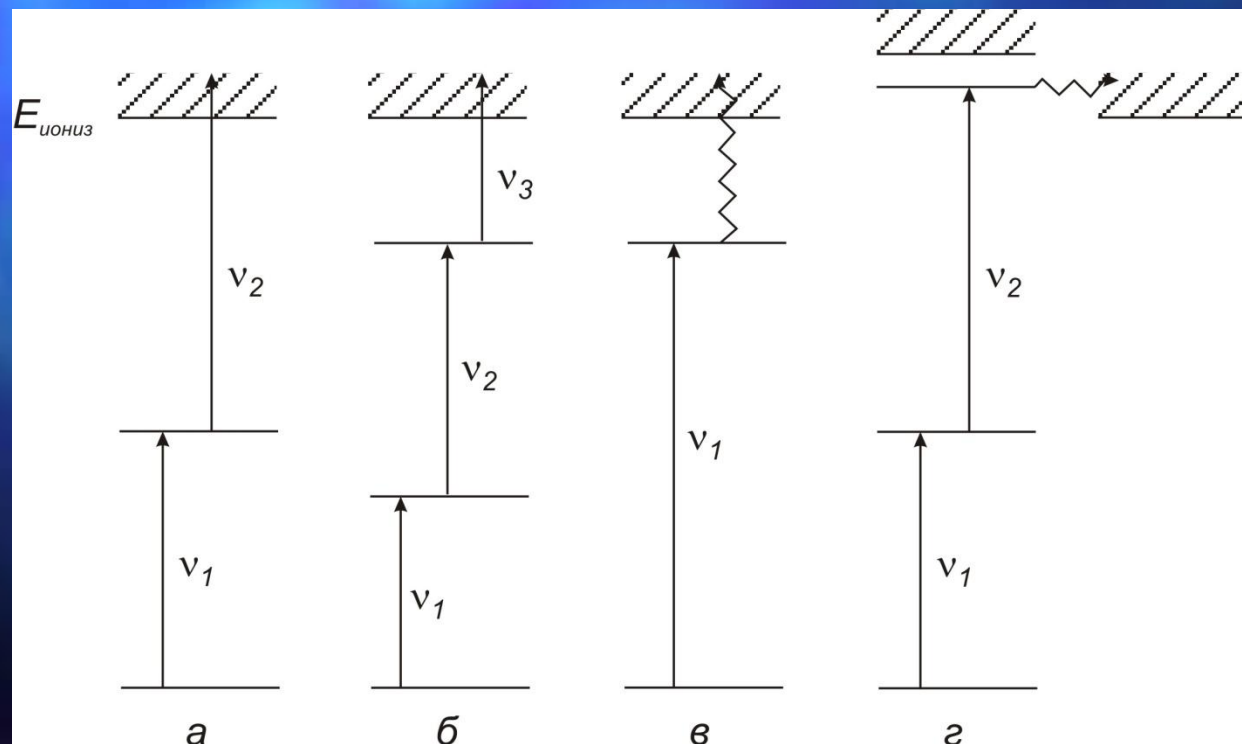
Лекция-16



Лазерное разделение изотопов

Двухступенчатая фотоионизация

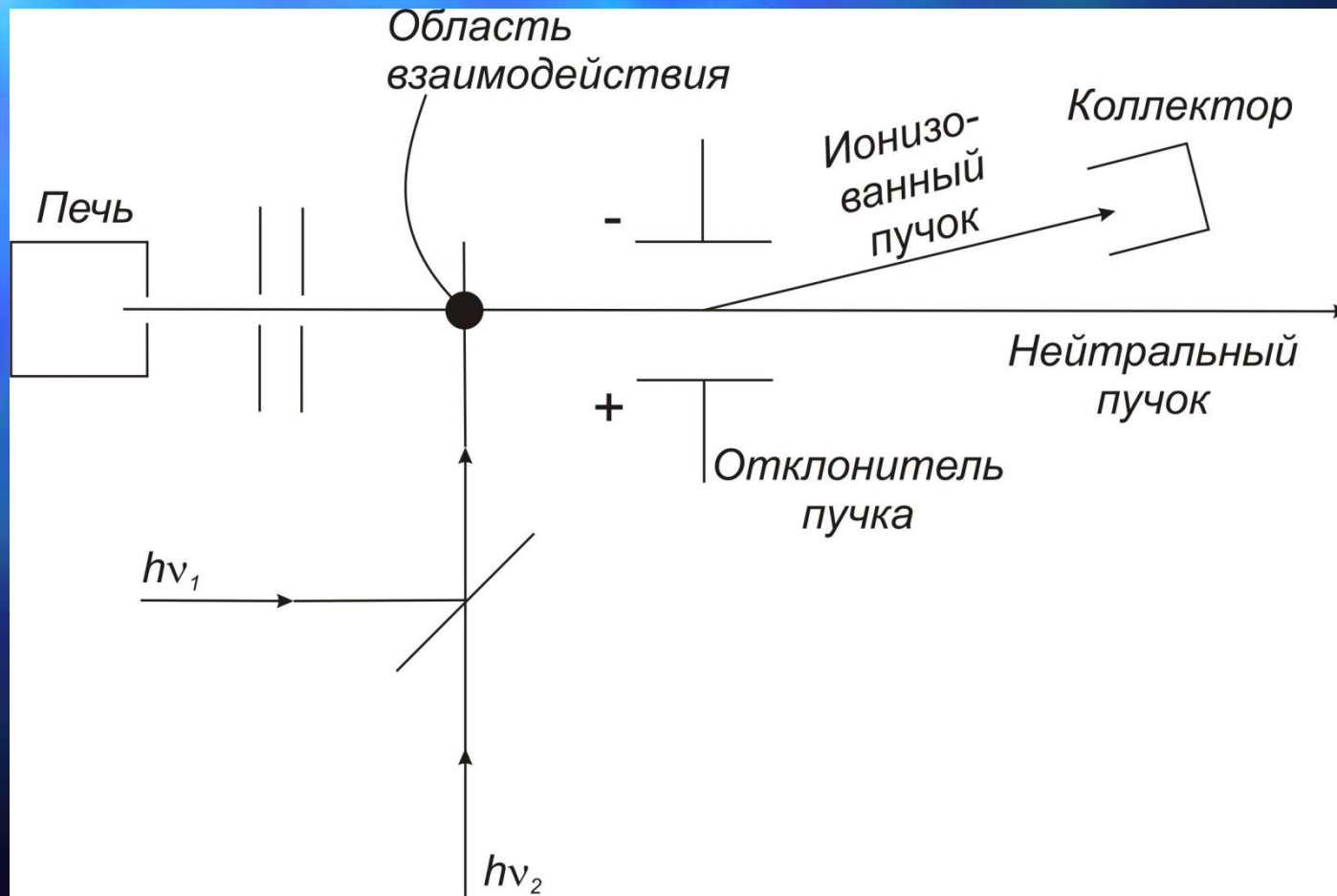
Двухступенчатая фотоионизация является атомным аналогом селективной двухфотонной диссоциации. Этот процесс широко использовался при лазерном разделении изотопов в парах атомов. На рисунке приведены несколько возможных схем селективной двухступенчатой фотоионизации. Все процессы изотопически селективны в первом переходе, когда излучение точно настроено на линию поглощения только одного изотопа.



Лазерное разделение изотопов

Двухступенчатая фотоионизация

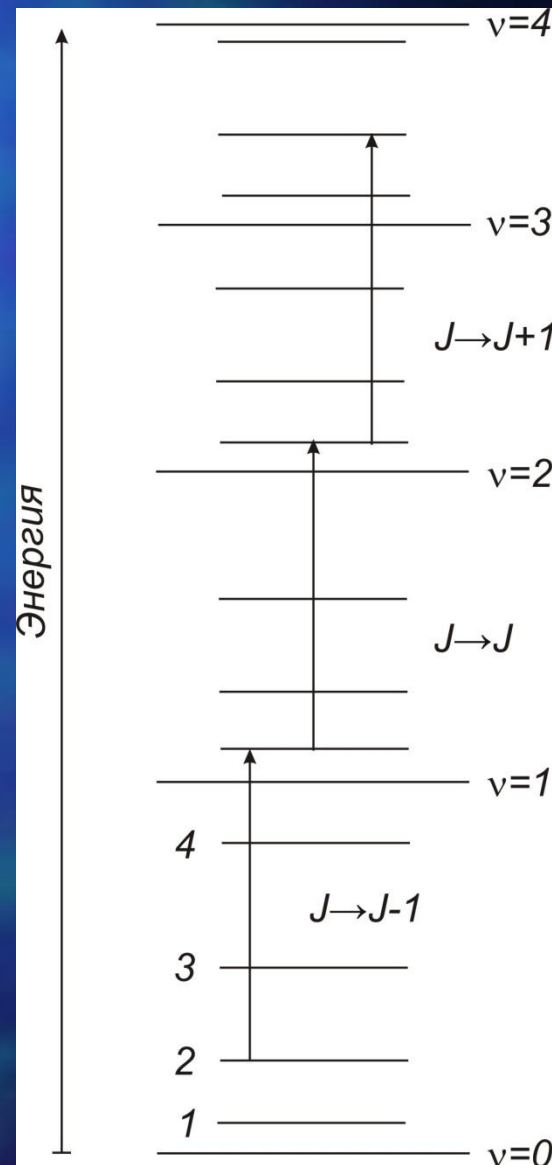
Схема устройства для разделения изотопов методом двухступенчатой фотоионизации.



Лазерное разделение изотопов

Многофотонная диссоциация

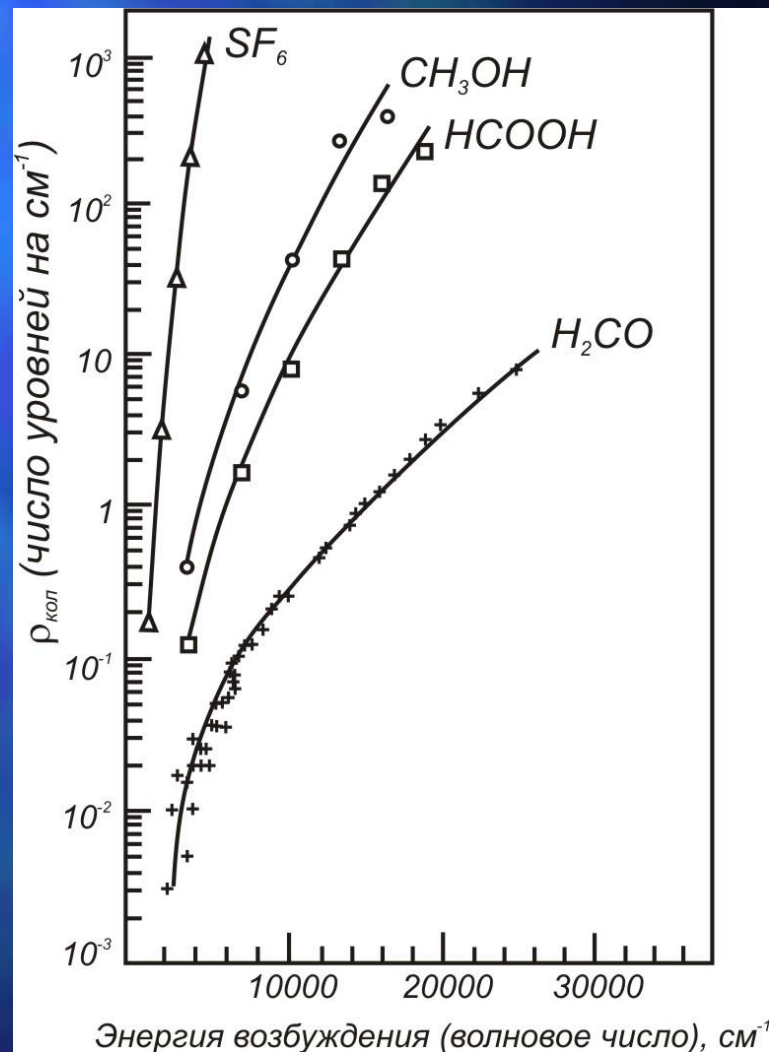
Многоатомная молекула, подвергаясь воздействию интенсивного ИК-излучения, в отсутствие соударений будет накапливать энергию поглощенного излучения в различных внутренних состояниях. При непрерывном облучении накапливаемая энергия может достигнуть величины, при которой происходит разрыв связи. Это явление часто сопровождается люминесценцией в видимой или УФ-областях. Начальное поглощение фотонов ИК-излучения происходит путем последовательных колебательно-вращательных переходов до уровня запасенной молекулой энергии $0,5 \text{ эВ}$. На этой стадии ангармоничность компенсируется сдвигами при переходе к другим вращательным ветвям ($P \rightarrow Q \rightarrow R$) с возрастанием колебательного уровня. Когда достигается высоковозбужденное колебательное состояние ($\nu=3$ или 4), перекрытие колебательных состояний разных типов порождает квазиконтинуальное состояние. Это приводит к быстрому перераспределению накопленной энергии в соответствующую колебательную моду, что облегчает дальнейшее поглощение фотонов.



Лазерное разделение изотопов

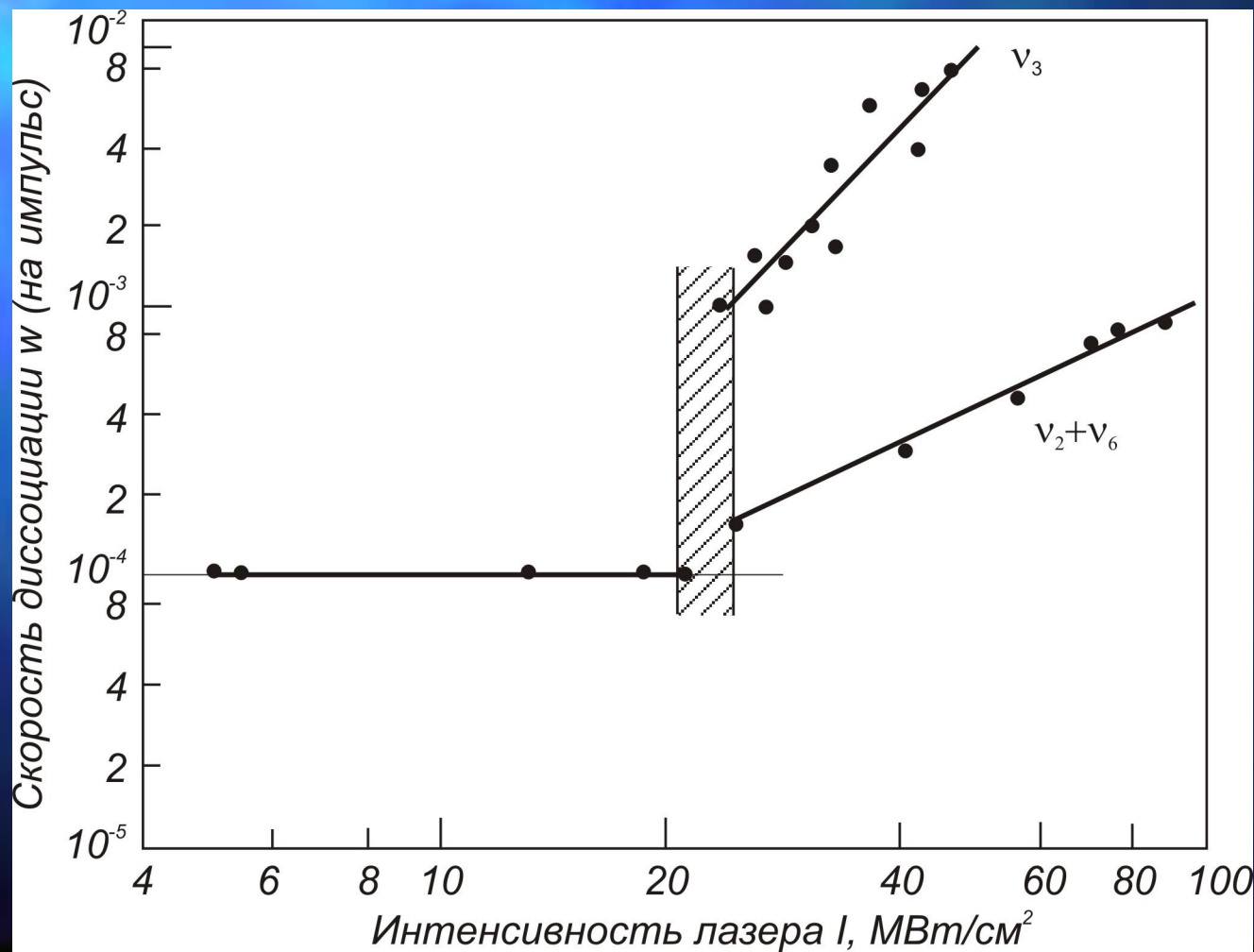
Многофотонная диссоциация

На рисунке показано, как возрастает плотность молекулярных колебательных состояний с увеличением энергии возбуждения некоторых многоатомных молекул. При $\rho_{\text{кол}} > 1-10$ на 1 см^{-1} возникает квазиконтинуум колебательных состояний. Для SF_6 это состояние достигается при превышении энергии возбуждения всего 3000 см^{-1}



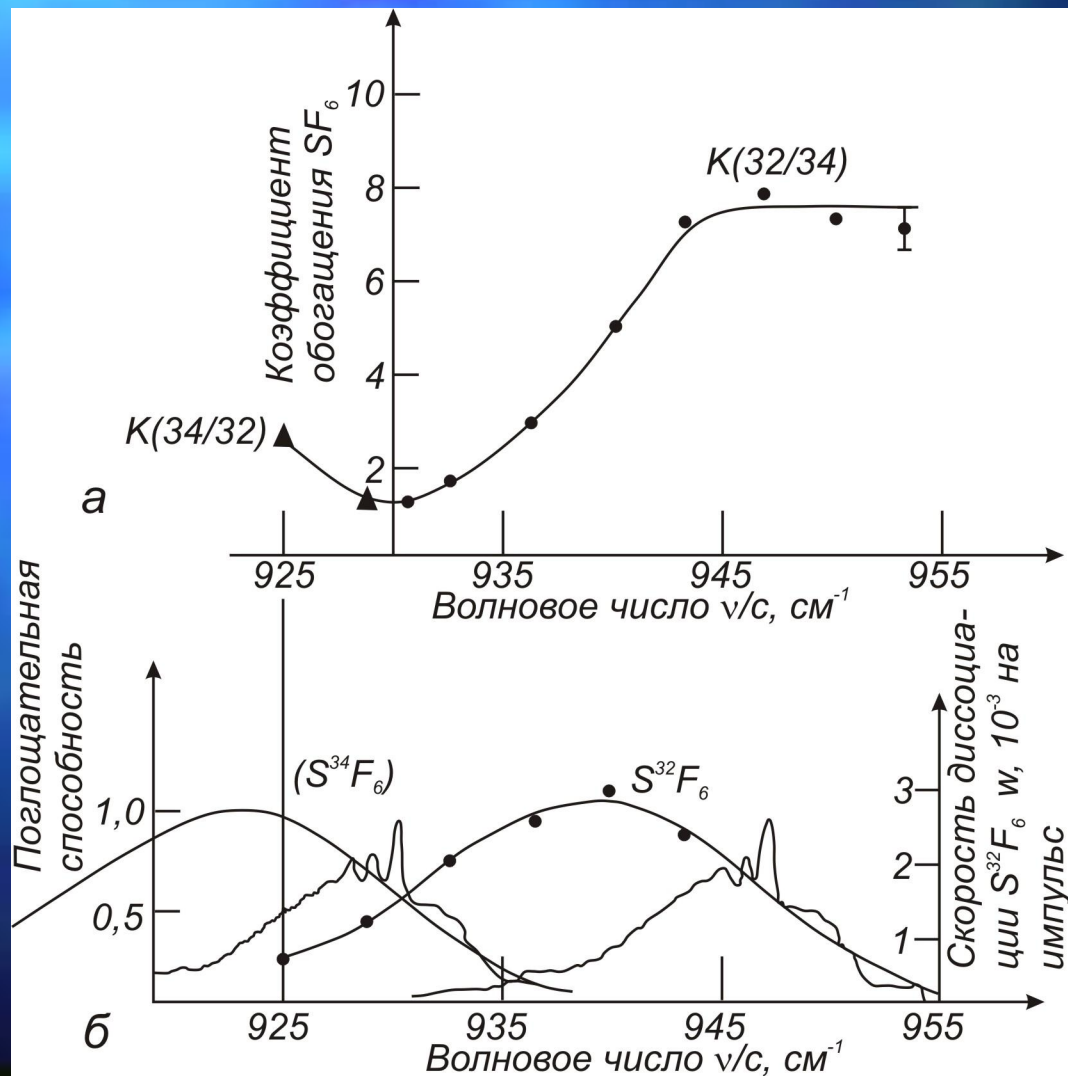
Лазерное разделение изотопов серы

На рисунке показан пороговый характер диссоциации молекул SF_6 при возбуждении излучением CO_2 - лазера основного ν_3 и составного $\nu_2 + \nu_6$ колебаний молекулы SF_6



Лазерное разделение изотопов серы

Зависимость коэффициента обогащения S^{32}/S^{34} и сечения поглощения молекул SF_6 от волнового числа лазерного излучения.



Лазерное разделение изотопов изотопов в атомной энергетике

Экономические проблемы.

Типичный реактор на легкой воде вырабатывает 10^9 Вт энергии. Это требует переработки 600 тонн руды U_3O_8 для первой заправки и затем 200 тонн ежегодно для дозаправки. Топливо обогащается до содержания в 3% U^{235} при естественном содержании 0,75%. После обогащения остается обедненный UF_6 с содержанием U^{235} в 0,2-0,3 %. В промышленности развиты два типа обогащения: газодиффузионное и газоцентрифуговое.

Газовая диффузия требует затрат 5 МэВ на атом U^{235} , технология центрифугового разделения – 0,3 МэВ на атом.

Стоимость разделения составляет 5 млн. долларов на 1 тонну U^{235} .

Оценим энергетические затраты лазерного метода. Для разделения 1 атома требуется порядка 10 эВ, что с учетом к.п.д. лазеров, затрат на химическую обработку и содержания U^{235} в природной руде дает значение около 1 кэВ на атом. При этом очень высокая селективность, присущая лазерному методу позволила бы сократить потребности в новой руде на 40%.

2-ой путь – использование природного урана а реакторах с тяжелой водой. В этом случае возникает не менее сложная задача получения тяжелой воды, так как природное содержание дейтерия составляет 1 атом на 5000 атомов водорода.

Лазерное разделение изотопов изотопов в атомной энергетике

Наиболее перспективные методы для разделения изотопов урана.

По аналогии с разделением изотопов серы методом многофотонной диссоциации молекул SF_6 были осуществлены попытки разделения изотопов урана многофотонной диссоциацией молекул гексафторида урана. Однако, в отличие от SF_6 , молекулы UF_6 поглощают излучение в более длинноволновой области 16 мкм, в которой нет мощных лазерных источников. Преобразование излучения CO_2 -лазеров в этот диапазон с помощью комбинационного рассеяния в водороде позволило достичь эффекта разделения, однако коэффициент обогащения был значительно меньше, чем в случае SF_6 .

Наиболее перспективным методом оказался метод ионизации атомов в атомарном пучке: AVLIS-метод (atomic vapor laser isotope separation). Несмотря на то, что температура кипения металлического урана составляет 2600 К, использование лазеров на парах меди со средней мощностью 4 кВт, длительностью импульса 20 нс и частотой повторения импульсов 23 кГц позволило получить достаточные для промышленного использования коэффициенты поглощения. Поскольку энергия ионизации U^{235} составляет 6 эВ, процесс ионизации обеспечивается за счет трехфотонного поглощения.

Лазерное получение особо чистых веществ

В качестве примера приведем получение особо чистых материалов микроэлектроники.

Для получения особо чистого кремния газ SiH_4 очищался от остаточных примесей с помощью излучения эксимерного ArF - лазера с длиной волны 196 нм. В результате органические примеси диссоциировали и получен кремний с рекордным значением содержания примесей -10^{10} в см^3 .

Один из важных материалов полупроводниковой электроники – трихлорид мышьяка – AsCl_3 очищается от основных примесей – 1,2-дихлорэтана $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ и четыреххлористого углерода $-\text{CCl}_4$ облучением излучения CO_2 - лазера, которое приводит к диссоциации молекул примесей при настройке частота на соответствующие линии поглощения .

Лазерный синтез новых соединений

1. Поливинилхлорид –лазерное излучение позволило снизить температуру синтеза и избавиться от примесей.
2. Синтез витамина D (2 стадии- KrF и азотный лазеры)
3. Фрагментация молекул: $SF_6 \rightarrow SF_5 \rightarrow SF_4$
4. Синтез молекулы P_2N_5